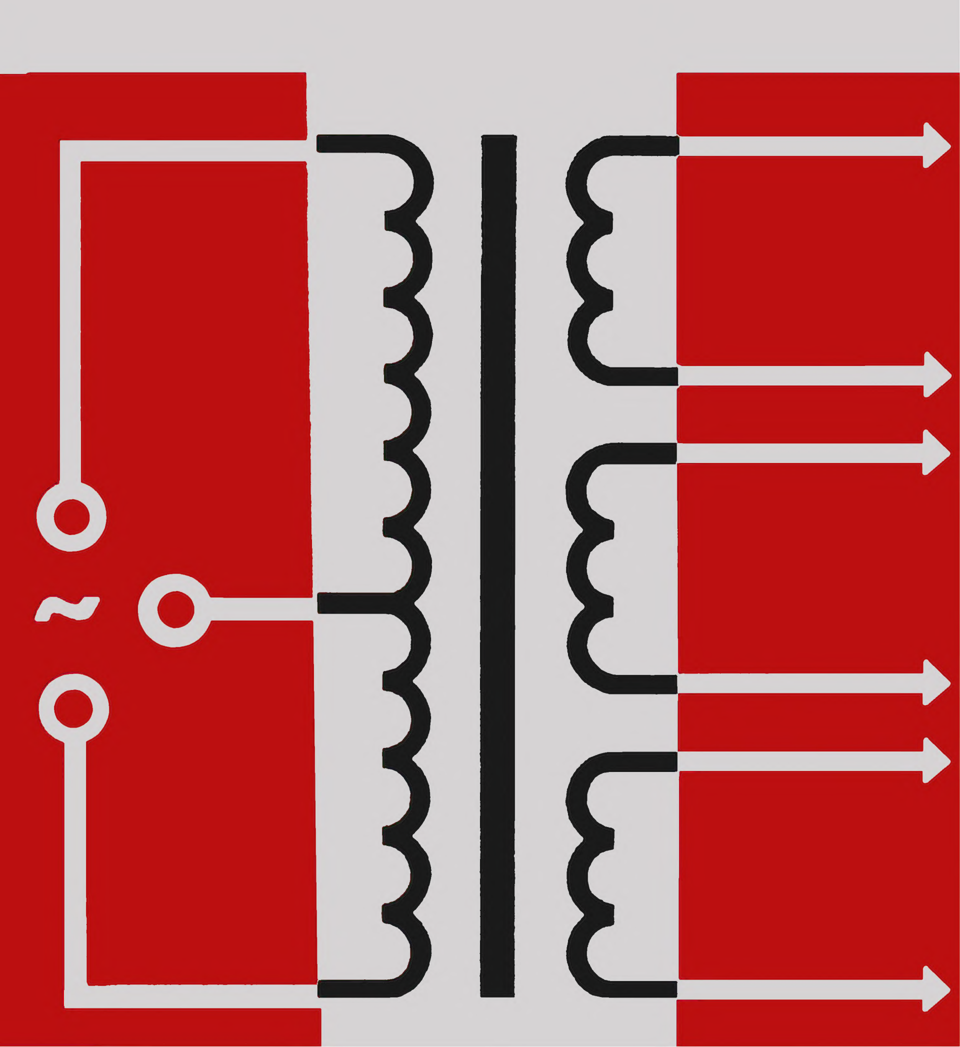
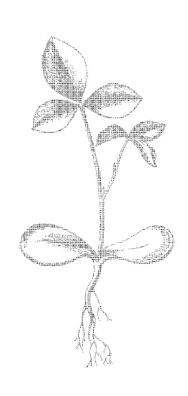
Б. МАЗЕЛЬ

ТРАНСФОРМАТОРЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ



К. Б. МАЗЕЛЬ

ТРАНСФОРМАТОРЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ



БЭ

МОСКВА · ЭНЕРГОИЗДАТ · 1982

ББК 31.261.8
М 13
УДК 621.311.6

Рецензент Е. И. Каретникова

Мазель К. Б.

М 13 Трансформаторы электропитания. — М.: Энергоиздат, 1982. — 80 с., ил.

20 к.

В книге рассматриваются принцип действия и устройство маломощных трансформаторов для электропитания различных радиоэлектронных устройств. Приводится несложная методика расчета трансформаторов электропитания с учетом особенностей схем, в которых их применяют, даются примеры расчетов. Содержатся справочные данные, необходимые для расчета трансформаторов.

Для читателей, занимающихся бытовой электроникой и радиоэлектроникой.

М $\frac{2402020000\text{-}149}{051(01)\text{-}82}$ 195-82

ББК 31.261.8
6Ф2.14

ПРЕДИСЛОВИЕ

Среди многочисленных и разнообразных электротехнических устройств трансформаторы по широте распространения и универсальности применения занимают одно из первых мест. Теоретические основы работы трансформатора — законы электромагнитной индукции — были сформулированы М. Фарадеем и русским ученым Э. Х. Ленцем в 30-х годах прошлого столетия. В 1877 г. П. Н. Яблочков изобрел трансформатор переменного тока, который был им назван «индукционной катушкой». Большой вклад в теорию и практику трансформаторостроения внесли русские ученые Б. А. Введенский, Г. С. Ландсберг, В. К. Аркадьев, К. А. Круг, П. Л. Калантаров, Л. Р. Нейман, Г. Н. Петров, П. М. Тихомиров, Г. С. Цыкин, а также югославский ученый М. Видмар.

Трансформаторы входят в состав большинства электротехнических аппаратов и приборов. Их применяют в схемах источников питания радиоэлектронной аппаратуры различного назначения, в схемах электробытовых приборов, на силовых подстанциях коммунальных, промышленных и тяговых сетей.

Однако применение трансформаторов не ограничивается этими областями. Трансформаторы широко используют в усилителях и генераторах низкой (звуковой) частоты в качестве междукаскадных и выходных трансформаторов, а также в цепях высокочастотных контуров приемно-усилительных устройств. Специальные импульсные трансформаторы применяют в различных импульсных схемах современной радиоаппаратуры. Трансформаторы, работающие в особом режиме, используют в схемах транзисторных преобразователей напряжения (инверторов), которые служат для преобразования постоянного напряжения в переменное.

Мощность, габаритные размеры и масса различных трансформаторов варьируются в очень широких пределах. Мощность, отдаваемая трансформатором в нагруз-

ку, может лежать в пределах от единиц ватт до тысяч киловатт. Соответственно габаритные размеры могут быть в пределах от долей сантиметра до нескольких метров, а масса — от единиц граммов до десятков тонн.

В зависимости от областей применения трансформаторы можно разделить на следующие основные группы: силовые трансформаторы вторичного электропитания (трансформаторы малой и большой мощности), трансформаторы для инверторов, трансформаторы низкой (звуковой) частоты, высокочастотные трансформаторы, импульсные трансформаторы.

Требования, предъявляемые к трансформаторам различных групп, существенно отличаются друг от друга. Например, одними из основных показателей трансформаторов электропитания являются коэффициент полезного действия (КПД) для трансформаторов большой мощности и превышение температуры для трансформаторов малой мощности; для трансформаторов низкой частоты важным параметром является частотная характеристика; для оценки высокочастотных трансформаторов используется значение их добротности; импульсные трансформаторы характеризуются степенью искажения трансформируемого импульса; трансформаторы для преобразователей напряжения (инверторов) должны иметь магнитопровод из материала с малыми удельными потерями и с прямоугольной петлей перемагничивания.

Разнообразие требований, предъявляемых к трансформаторам отдельных групп, естественно, приводит к значительным различиям в методах их расчета и конструирования. Поэтому для каждой группы трансформаторов имеется своя специализированная литература. Так, трансформаторам низкой частоты посвящена книга [1], с высокочастотными трансформаторами можно познакомиться в [2], с импульсными — в [3], а с трансформаторами для инверторов — в [4, 11].

В данной книге рассматриваются только трансформаторы электропитания малой мощности, расчет и конструирование которых имеют свои особенности по сравнению с трансформаторами большой мощности. Расчету и конструированию последних посвящено большое число книг, среди которых нужно особо отметить книгу основоположника современного трансформаторостроения М. Видмара [5], вышедшую в СССР в 1931 г. В ней обобщен богатейший опыт автора и дано теорети-

ческое и практическое решение многочисленных проблем трансформаторостроения, включая разработанную автором теорию нагрева трансформаторов и впервые рассмотренные технико-экономические вопросы проектирования трансформаторов. Из современных книг по мощным трансформаторам можно рекомендовать [6, 7].

Значительно меньшее число книг посвящено расчету и конструированию маломощных трансформаторов питания. Эти вопросы достаточно подробно рассмотрены в [8—10], а также в некоторых других изданиях.

Расчет трансформаторов электропитания обычно тесно связан с устройствами, в которых их используют. В частности, параметры трансформатора электропитания зависят от схемы выпрямителя, на которую он работает, и от схемы сглаживающего фильтра. Эти особенности расчета учитываются в предлагаемой книге.

Отзывы и замечания по книге просим присылать по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоиздат.

Автор

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО ТРАНСФОРМАТОРА

Назначение. Для работы радиотехнических и электронных устройств необходимо иметь один или несколько источников постоянного напряжения. Эти источники обычно называют источниками вторичного электропитания (ИВЭ). Первичными источниками электропитания в подавляющем большинстве случаев являются сети переменного напряжения 127 и 220 В с частотой 50 Гц. Для питания самолетной и морской аппаратуры используются сети с частотой 400 Гц. Исключением являются маломощные устройства, например транзисторные приемники, первичным (и единственным) источником электропитания которых является батарея или аккумулятор.

Чтобы обеспечить аппаратуру нужными постоянными напряжениями необходимо сначала повысить или понизить переменное напряжение питающей сети до требуемых значений, а затем (с помощью выпрямителей) получить постоянные напряжения. Повышение или понижение напряжения питающей сети осуществляется трансформатором, который играет роль необходимого посредника между питающей сетью и потребителями постоянного напряжения. Очевидно, что трансформатор требуется и в тех случаях, когда нужно получить переменное напряжение, отличающееся от напряжения питающей сети (например, для питания накала электровакуумных приборов).

Трансформатор необходим также и тогда, когда первичным источником электропитания аппаратуры, требующей нескольких напряжений, является сеть постоянного тока (например, аккумуляторная или солнечная батарея). В таких случаях чаще всего применяют транзисторные (статические) преобразователи напряжения [11], в состав которых всегда входят трансформаторы с необходимым числом обмоток, что позволяет после выпрямления получить различные постоянные напряжения.

Таким образом, трансформатор является весьма гибким и универсальным преобразователем электрической

энергии, что обеспечило его исключительно широкое распространение.

Принцип действия трансформатора основан на законе электромагнитной индукции Фарадея, в соответствии с которым напряжение, возникающее на концах витка, пропорционально скорости изменения магнитного потока, пронизывающего этот виток. Если тот же магнитный поток пронизывает одновременно несколько витков, то он, естественно, возбуждает в каждом витке одинаковое напряжение. Это дает нам возможность путем последовательного соединения нескольких витков получать более высокие напряжения. В этих физических явлениях заложена идея трансформации переменного тока с помощью двух (или более) групп последовательно соединенных витков, называемых обмотками.

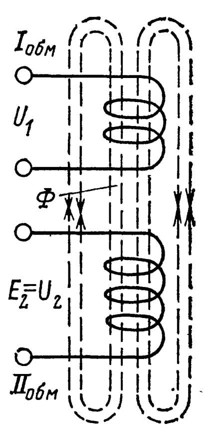


Рис. 1. Принцип действия трансформатора.

Если приложить переменное напряжение (т. е. меняющееся по значению и направлению) к концам обмотки, которую назовем первичной, то под действием этого напряжения через обмотку будет протекать переменный ток, создавая в окружающем обмотку пространстве переменный магнитный поток. Если этот магнитный поток будет пронизывать витки другой обмотки, называемой вторичной, то в ней возникнет переменное напряжение, называемое электродвижущей силой (ЭДС) вторичной обмотки, которое будет пропорционально числу ее витков и скорости изменения магнитного потока. Отсюда следует, что для трансформации переменного напряжения необходимо иметь две обмотки и охватывающий их переменный магнитный поток, изменяющийся по значению и направлению (рис. 1). Очевидно, что трансформатор может иметь несколько вторичных обмоток с разными напряжениями (ЭДС) и, следовательно, с разными числами витков, однако все обмотки должны быть пронизаны одним и тем же магнитным потоком.

Вернемся к процессам, происходящим в первичной обмотке трансформатора. Переменное напряжение, приложенное к первичной обмотке, создает переменный маг-

нитный поток; этот поток, пронизывая витки первичной обмотки, индуктирует в них переменное напряжение, почти равное приложенному напряжению, но противоположное ему по направлению. Индуктированное в первичной обмотке напряжение называют ЭДС первичной обмотки.

Электродвижущая сила первичной обмотки E_1 лишь незначительно меньше приложенного напряжения U_1 и почти полностью его уравновешивает. Напряжение U_1 обеспечивает также протекание так называемого намагничивающего тока, создающего переменный магнитный поток в трансформаторе. Так как ЭДС первичной обмотки и ЭДС вторичных обмоток вызываются одним и тем же магнитным потоком, то очевидно, что эта ЭДС и вторичные ЭДС совпадают между собой по направлению.

Электродвижущая сила вторичной обмотки E_2 реального трансформатора, который отличается от идеального наличием потерь энергии, будет немного больше напряжения U_2, измеренного на концах вторичной обмотки.

Если рассматривать идеальный трансформатор (без потерь энергии), то напряжения и ЭДС соответствующих обмоток будут равны между собой ($U=E$). Чем меньше потери энергии в трансформаторе, тем меньше отличаются напряжения от соответствующих ЭДС, поэтому в ряде случаев можно пользоваться приближенным равенством

$$U \approx E. \quad (1)$$

При прочих равных условиях число витков первичной обмотки всегда должно быть прямо пропорционально приложенному напряжению, а точнее — ЭДС первичной обмотки. Что касается числа витков вторичной обмотки, то выше уже отмечалось, что оно прямо пропорционально ЭДС вторичной обмотки[1]. Таким образом, приходим к первому основному закону трансформации: ЭДС вторичной обмотки так относится к ЭДС первичной обмотки, как число витков вторичной обмотки к числу витков первичной:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{w_2}{w_1}, \quad (2)$$

[1] Здесь говорится только о пропорциональности между ЭДС и числом витков обмоток, а не о соотношении между этими величинами, этот вопрос будет рассмотрен ниже.

или, учитывая (1), можно воспользоваться приближенным равенством

$$\frac{U_2}{U_1} \approx \frac{w_2}{w_1}. \tag{2a}$$

Рассмотрим вначале работу идеального трансформатора под нагрузкой. Если замкнуть вторичную обмотку на нагрузочное сопротивление, то по виткам вторичной обмотки будет проходить переменный ток. Этот ток вызовет появление нового магнитного потока, который по правилу Ленца будет направлен против основного потока и будет стремиться подавить этот основной поток, обеспечивающий трансформацию. Однако ЭДС первичной обмотки, созданная основным потоком и уравновешивающая приложенное напряжение, требует поддержания основного магнитного потока в том виде, каким он был до включения нагрузки. Для этого существует только один путь: одновременно с током нагрузки вторичной обмотки по первичной обмотке также должен протекать соответствующий ток нагрузки, зависящий от вторичного тока, а магнитные потоки, создаваемые этими токами нагрузок, должны быть противоположны по знаку и равны по значению.

Магнитные потоки компенсируют друг друга, в результате чего основной магнитный поток остается без изменения (не подавляется). Такой процесс происходит при работе трансформатора под нагрузкой. Очевидно, что первичная обмотка будет при этом пропускать два тока: ток нагрузки и ток намагничивания, создающий основной поток. Оба тока образуют первичный ток трансформатора. Так как магнитный поток пропорционален произведению тока обмотки на число ее витков (т. е. магнитодвижущей силе обмотки), то условие равенства магнитных потоков нагруженного трансформатора можно записать как

$$I_1 w_1 = I_2 w_2. \tag{3}$$

Если пренебречь током намагничивания, который обычно составляет малую долю первичного тока, то с помощью (3) можно сформулировать второй основной закон трансформации: ток первичной обмотки так относит-

ся к току вторичной обмотки, как число витков вторичной обмотки относится к числу витков первичной:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1}. \qquad (4)$$

Реальный трансформатор. Для того чтобы токи обмоток трансформатора обтекали каждый виток в нужном направлении, необходимо все витки изолировать друг от друга, поэтому обмотки изготавливают из проводов, покрытых снаружи изоляционным слоем эмали, шелка или хлопчатобумажной пряжи. Для уменьшения потерь энергии при трансформировании обмотки чаще всего делают из медного провода, обладающего наименьшим омическим (активным) сопротивлением. В некоторых случаях, с целью экономии дефицитной меди, для обмоток используют алюминиевый провод, сопротивление которого в 1,6 раза больше, чем медного. Естественно, что в этом случае потери энергии в обмотках трансформатора при равенстве сечений проводов возрастают во столько же раз.

Требование о том, чтобы обе обмотки трансформатора полностью охватывались одним и тем же основным магнитным потоком, может быть выполнено только в том случае, когда для магнитного потока будет создан путь с очень малым магнитным сопротивлением. Такой путь мы имеем возможность создать, применяя замкнутый магнитопровод из стали, при этом магнитный поток будет замыкаться внутри этого магнитопровода, не ответвляясь в окружающее пространство, которое представляет для потока большое магнитное сопротивление.

Теперь трансформатор представляется нам в виде стального магнитопровода, на котором располагаются обмотки из медного изолированного провода.

В реальном трансформаторе обнаруживаются некоторые отличия от идеального, на первый взгляд незначительные, но приводящие к ряду затруднений, в преодолении которых и заключается задача конструирования трансформатора.

В реальном трансформаторе медный провод первичной обмотки оказывает определенное сопротивление протекающему току, что вызывает падение напряжения в обмотке ΔU_1. В результате ЭДС E_1, наводимая в первичной обмотке, должна уравновешивать уже не все прило-

женное напряжение U_1, а только ту его часть, которая остается за вычетом падения напряжения ΔU_1 в обмотке; эта особенность реального трансформатора приводит к уменьшению ЭДС первичной обмотки.

Вторичная обмотка также обладает сопротивлением, которое и в этом случае является причиной, вызывающей падение напряжения в обмотке ΔU_2. Это падение вычитается из ЭДС E_2, индуктированной во вторичной обмотке. На выводах вторичной обмотки трансформатора действует напряжение U_2, меньшее, чем ЭДС вторичной обмотки.

В реальном трансформаторе не весь магнитный поток, возбуждаемый первичной обмоткой, пронизывает витки вторичной обмотки, часть магнитного потока замыкается через воздух, оставляя в стороне вторичную обмотку. Это приводит к уменьшению ЭДС вторичной обмотки, что равноценно увеличению падения напряжения. Такое же явление возникает и в том случае, когда магнитный поток вторичной обмотки охватывает не все витки первичной обмотки.

Потери энергии на перемагничивание стального магнитопровода и на создание в нем вредных вихревых токов приводят к возрастанию тока первичной обмотки на значение, необходимое для компенсации этих потерь. Поэтому потери энергии в магнитопроводе вызывают дополнительное увеличение падения напряжения в первичной обмотке.

Итак, в отличие от идеального трансформатора в реальном трансформаторе имеются потери энергии в меди, обусловленные падением напряжения в обмотках, и потери энергии в стали, складывающиеся из потерь на перемагничивание и на вихревые токи. Энергия всех этих потерь выделяется в виде теплоты, которая нагревает трансформатор; его температура будет возрастать до тех пор, пока не установится равновесие между теплотой, выделяемой в трансформаторе, и теплотой, отдаваемой трансформатором во внешнюю среду. Температура трансформатора устанавливается не сразу, сначала она возрастает довольно быстро, а затем ее рост замедляется. Чем больше поверхность охлаждения трансформатора, тем ниже будет его установившаяся температура. Время установления температуры меняется от 1—2 ч для маломощных трансформаторов до 20—30 ч для трансформаторов большой мощности. Разность между установив-

шейся температурой и температурой окружающей среды пропорциональна потерям энергии и называется превышением температуры трансформатора.

Если реальный трансформатор не нагружен, т. е. работает в режиме холостого хода, то ток первичной обмотки (ток холостого хода) состоит из тока намагничивания, создающего магнитный поток, и тока, компенсирующего потери энергии в стали, а ЭДС и напряжения соответствующих обмоток практически равны между собой. В режиме холостого хода трансформатор нагревается только за счет потерь в стали магнитопровода; потери в меди, вызываемые током холостого хода, очень малы. В нагруженном трансформаторе ток холостого хода суммируется с током нагрузки первичной обмотки.

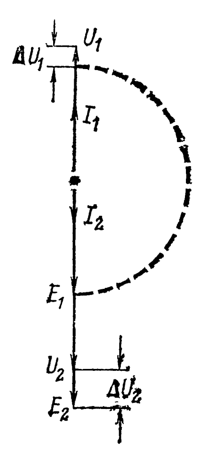


Рис. 2. Упрощенная векторная диаграмма нагруженного трансформатора.

Напряжения, ЭДС и токи трансформатора удобно представлять в виде векторной диаграммы, на которой все эти величины изображаются векторами определенной длины и направления. На рис. 2 показана упрощенная векторная диаграмма нагруженного трансформатора, у которого ЭДС вторичной обмотки E_2 в 2 раза больше ЭДС первичной обмотки E_1, при этом в соответствии со вторым основным законом трансформации (4) ток вторичной обмотки I_2 будет в 2 раза меньше тока первичной I_1 (без учета тока холостого хода). На диаграмме векторами ΔU_1 и ΔU_2 обозначены соответственно падения напряжения в первичной и вторичной обмотках.

Конструкция трансформатора. Рассмотрим вкратце некоторые вопросы конструкции маломощных трансформаторов, в том числе устройство магнитопроводов и обмоток.

Магнитопровод. Как уже было отмечено, магнитопровод трансформатора должен быть замкнутым стальным. На рис. 3 показаны наиболее употребительные типы магнитопроводов, применяемые для трансформаторов питания. Чтобы уменьшить потери на перемагничивание стали, для магнитопроводов применяют специальную элек-

тротехническую сталь (например, марок 3411—3414, 3421—3424), представляющую собой сплав железа с 0,5—5% кремния. Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопровод набирают из изолированных друг от друга тонких (0,2—0,5 мм) пластин (рис. 3, *а—в*) или навивают из изолированной ленты толщиной 0,05—0,1 мм (рис. 3, *г*, *д*), при этом возрастает электрическое сопротивление магнитопровода, что снижает силу вихревых токов и, следовательно, потери.

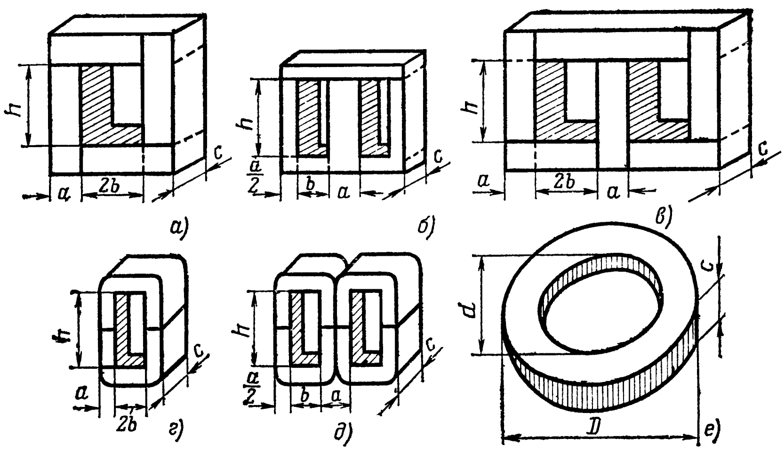


Рис. 3. Основные типы магнитопроводов.

Для трансформаторов, работающих на повышенных частотах (до 25 кГц) в схемах транзисторных преобразователей напряжения [4, 11], применяют ленточные кольцевые магнитопроводы (рис. 3, *е*) из специальных сплавов железа с никелем, содержащих от 36 до 80% никеля и некоторые другие элементы (например, молибден, кобальт, хром, марганец). Толщина ленты у этих магнитопроводов лежит в пределах от 0,01 до 0,05 мм. Сплавы указанного типа (например, марок 50НП, 79НМ) называют пермаллоями. Следует иметь в виду, что при уменьшении толщины стали падают потери на вихревые токи, но растут потери на перемагничивание. Поэтому в зависимости от частоты преобразователя следует выбирать материал для магнитопровода такой оптимальной толщины, чтобы уменьшение потерь на вихревые токи не перекрывалось увеличением потерь на перемагничивание.

Магнитопроводы состоят из одного или нескольких стержней и ярма, замыкающего магнитный поток. Сечение ярма обычно равно или несколько больше сечения стержня; в последнем случае ярмо называют усиленным. Кольцевой магнитопровод (рис. 3, *е*) можно рассматривать как магнитопровод с одним стержнем. На рис. 3 все стержни (кроме рис. 3, *е*) расположены вертикально. На стержнях размещаются обмотки трансформатора.

На рис. 3, *а*, *г* изображены магнитопроводы стержневого (П-образного) типа с неразветвленной магнитной цепью. Они имеют по два стержня. На рис. 3, *б*, *д* показаны магнитопроводы броневого (Ш-образного) типа с одним стержнем и разветвленной магнитной цепью. Магнитный поток выходит из стержня и разделяется на две части, каждая из которых замыкается через верхнее, боковое и нижнее ярма. На рис. 3, *в* показан трехфазный магнитопровод, имеющий три стержня. Трехфазные трансформаторы с такими магнитопроводами применяют при достаточно больших мощностях в отличие от маломощных однофазных трансформаторов, для которых используются стержневые, броневые и кольцевые магнитопроводы.

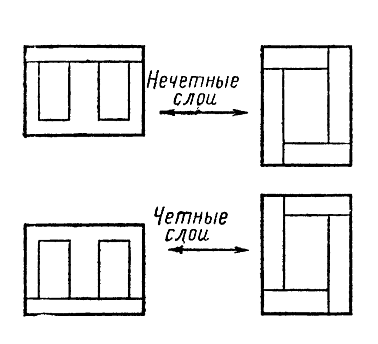


Рис. 4. Способы сборки магнитопроводов из пластин.

Магнитопроводы, показанные на рис. 3, *а*—*в*, изготовляют из штампованных пластин, которые после штамповки обычно отжигают в воздушной среде при 400—500° С для улучшения магнитных свойств. Способ сборки магнитопроводов из таких пластин показан на рис. 4. Каждый последующий слой перекрывает стыки предыдущего слоя. Такой способ называется сборкой внахлестку или вперекрышку. Сборка впритык, когда все слои имеют одинаковый рисунок, создает в местах стыка воздушный зазор, увеличивающий магнитное сопротивление. В связи с этим в небольших магнитопроводах из пластин сборку впритык не применяют. Изоляцией между пластинами обычно служит пленка окиси, которая об-

разуется при изготовлении электротехнической стали на заводе или при отжиге.

Для изготовления ленточных разрезных магнитопроводов (рис. 3, *г*, *д*) ленту из электротехнической стали навивают на металлическую оправку, а затем отжигают на воздухе при температуре 400—500° С для улучшения ее магнитных свойств. После этого магнитопровод обволакивают склеивающим составом либо пропитывают лаком, которые скрепляют навитую ленту. Обработанный таким способом магнитопровод разрезается в местах, показанных на рис. 3, *г*, *д*. Магнитопроводы стержневого типа (рис. 3, *г*) состоят из двух, а магнитопроводы броневого типа (рис. 3, *д*) — из четырех П-образных одинаковых частей. В данном случае сборка этих частей производится впритык, так как места стыка хорошо пришлифовываются друг к другу, а затем склеиваются специальным клеем, имеющим малое магнитное сопротивление.

В табл. 1 и 2 приведены параметры некоторых пластинчатых и витых разрезных магнитопроводов броневой и стержневой конструкций.

Кольцевые (неразрезные) магнитопроводы из тонких ленточных материалов (пермаллоев) во время навивки покрывают электроизолирующим материалом, а затем отжигают в вакууме при 1000—1100° С. Разрезать такие магнитопроводы нельзя, так как при этом значительно ухудшаются их магнитные свойства. Пермаллоевые магнитопроводы очень чувствительны к механическим деформациям и ударам, которые заметно ухудшают их магнитные свойства. Поэтому такие магнитопроводы обычно помещают в пластмассовые коробки с мягкими (резиновыми) уплотнительными прокладками. Коробки герметизируются для защиты магнитопроводов от попадания в них пропиточных материалов, используемых при изготовлении трансформатора, которые могут вызвать механические деформации магнитопровода при колебаниях окружающей температуры.

В табл. 3 приведены данные некоторых кольцевых магнитопроводов.

На рис. 3 все магнитопроводы имеют сечение прямоугольной формы, что обусловлено удобством и простотой их изготовления. Для трансформаторов большой мощности часто применяют магнитопроводы более сложной конструкции с крестообразным сечением; это позво-

Таблица 1

Параметры некоторых пластинчатых и витых разрезных магнитопроводов броневого типа

Тип магнитопровода	a, см	b, см	h, см	c, см	Средняя длина магнитной линии $l_С$, см	Средняя длина витка $l_М$, см	Сечение стержня $Q_С=ac$, см^2	Площадь окна $Q_О$, см^2	$Q_С$ $Q_О$, см^4	Масса магнитопровода G, кг
Ш6×6,5	0,6	0,6	1,5	0,65	5,1	4,4	0,39	0,9	0,35	0,014
Ш6×8	0,6	0,6	1,5	0,8	5,1	4,7	0,48	0,9	0,43	0,017
Ш6×10	0,6	0,6	1,5	1	5,1	5,1	0,6	0,9	0,54	0,021
Ш6×12,5	0,6	0,6	1,5	1,25	5,1	5,6	0,75	0,9	0,68	0,026
Ш8×8	0,8	0,8	2	0,8	6,9	5,7	0,64	1,6	1,02	0,030
Ш8×10	0,8	0,8	2	1	6,9	6,1	0,8	1,6	1,28	0,037
Ш8×12,5	0,8	0,8	2	1,25	6,9	6,6	1	1,6	1,6	0,047
Ш8×16	0,8	0,8	2	1,6	6,9	7,3	1,28	1,6	2,04	0,060
Ш10×10	1	1	2,5	1	8,6	7,1	1	2,5	2,5	0,059
Ш10×12,5	1	1	2,5	1,25	8,6	7,6	1,25	2,5	3,12	0,073
Ш10×16	1	1	2,5	1,6	8,6	8,3	1,6	2,5	4	0,094
Ш10×20	1	1	2,5	2	8,6	9,1	2	2,5	5	0,117
Ш12×12,5	1,2	1,2	3	1,25	10,3	8,7	1,5	3,6	5,4	0,105
Ш12×16	1,2	1,2	3	1,6	10,3	9,4	1,92	3,6	6,9	0,135
Ш12×20	1,2	1,2	3	2	10,3	10,2	2,4	3,6	8,6	0,168
Ш12×25	1,2	1,2	3	2,5	10,3	11,2	3	3,6	10,8	0,211
Ш16×16	1,6	1,6	4	1,6	13,7	11,4	2,56	6,4	16,4	0,239
Ш16×20	1,6	1,6	4	2.0	13,7	12,2	3,2	6,4	20,6	0,299
Ш16×25	1,6	1,6	4	2,5	13,7	13,2	4	6,4	25,6	0,374
Ш16×32	1,6	1,6	4	3,2	13,7	14,6	5,1	6,4	32,8	0,477
Ш20×20	2	2	5	2	17,1	14,3	4	10	40	0,468
Ш20×25	2	2	5	2,5	17,1	15,3	5	10	50	0,585
Ш20×32	2	2	5	3,2	17,1	16,7	6,4	10	64	0,748
Ш20×40	2	2	5	4	17,1	18,3	8	10	80	0,935
Ш25×25	2,5	2,5	6,25	2,5	21,4	17,9	6,25	15,6	97	0,914

Ш25×32	2,5	2,5	6,25	3,2	21,4	19,3	8	15,6	125	1,17
Ш25×40	2,5	2,5	6,25	4	21,4	20,9	10	15,6	156	1,47
Ш25×50	2,5	2,5	6,25	5	21,4	22,9	12,5	15,6	195	1,83
Ш32×32	3,2	3,2	8	3,2	27,4	22,8	10,2	25,6	261	1,91
Ш32×40	3,2	3,2	8	4	27,4	24,4	12,8	25,6	328	2,39
Ш32×50	3,2	3,2	8	5	27,4	26,4	16	25,6	410	2,99
Ш32×64	3,2	3,2	8	6,4	27,4	29,2	20,5	25,6	525	3,84
Ш40×40	4	4	10	4	34,3	28,6	16	40	640	3,74
Ш40×50	4	4	10	5	34,3	30,6	20	40	800	4,68
Ш40×64	4	4	10	6,4	34,3	33,4	25,6	40	1020	5,99
Ш40×80	4	4	10	8	34,3	36,6	32	40	1280	7,49

Примечание. В обозначение витых разрезных магнитопроводов добавляется буква Л — ленточный (например, ШЛ25×32).

Таблица 2

Параметры некоторых пластинчатых и витых разрезных магнитопроводов стержневого типа

Тип магнитопровода	a, см	$2b$, см	h, см	c, см	Средняя длина магнитной линии l_c, см	Средняя длина витка l_M, см	Сечение стержня $Q_C=ac$, см²	Площадь окна $Q_0=bh$, см²	$Q_C\ Q_0$, см⁴	Масса магнитопровода G, кг
П22×32×28	2,2	1,9	2,8	3,2	16	13,8	7	2,7	18,9	0,81
П22×32×36	2,2	1,9	3,6	3,2	18	13,8	7	3,4	23,8	0,9
П22×32×46	2,2	1,9	4,6	3,2	20	13,8	7	4,4	30,8	1,0
П22×32×58	2,2	1,9	5,8	3,2	22	13,8	7	5,5	38,5	1,12
П27×40×36	2,7	2,4	3,6	4,0	20	17,2	10,8	4,3	46,4	1,57
П27×40×46	2,7	2,4	4,6	4,0	22,8	17,2	10,8	5,5	59,4	1,72
П27×40×58	2,7	2,4	5,8	4,0	25	17,2	10,8	6,9	74,4	1,91
П27×40×73	2,7	2,4	7,3	4,0	28	17,2	10,8	8,7	93,8	2,18
П34×50×46	3,4	3,0	4,6	5,0	26	21,5	17	6,9	117	3,14
П34×50×58	3,4	3,0	5,8	5,0	28	21,5	17	8,7	148	3,44
П34×50×73	3,4	3,0	7,3	5,0	30,5	21,5	17	10,9	185	3,82
П34×50×90	3,4	3,0	9,0	5,0	33	21,5	17	13,5	230	4,3

Примечание. В обозначение витых разрезных магнитопроводов добавляется буква Л—ленточный (например, ПЛ27×40×36).

ляет использовать катушки не прямоугольного, а круглого сечения, более удобные в изготовлении и уменьшающие расход медного провода.

Обмотки трансформатора. На рис. 5 показано расположение обмоток трансформатора на магнитопроводах броневого и стержневого типов. Конструкция броневого типа имеет одну катушку, а стержневого типа—две одинаковые катушки. Катушки почти полностью заполняют свободное пространство, образованное стержнями и ярмом и называемое окном магнитопровода. Можно себе представить магнитопровод стержневого типа с одной катушкой, заполняющей всю площадь окна (второй стержень остается свободным). Однако такие трансформаторы на практике почти не применяются, так как масса меди у них будет значительно больше, чем у двухкатушечных трансформаторов. Каждая катушка имеет две обмотки. Сначала наматывается первичная обмотка, а затем вторичная. В некоторых случаях обмотки меняют местами. В трансформаторе стержневого типа каждая обмотка делится на две равные части, которые располагаются на отдельных катушках; эти половины обмоток могут соединяться между собой либо последовательно, либо параллельно. Конструкция катушек, показанная на рис. 5, называется цилиндрической, поскольку обмотки располагаются концентрически одна над другой. Секционированная конструкция катушек, где обмотки состоят из нескольких дисковых секций, в трансформаторах питания почти не применяется.

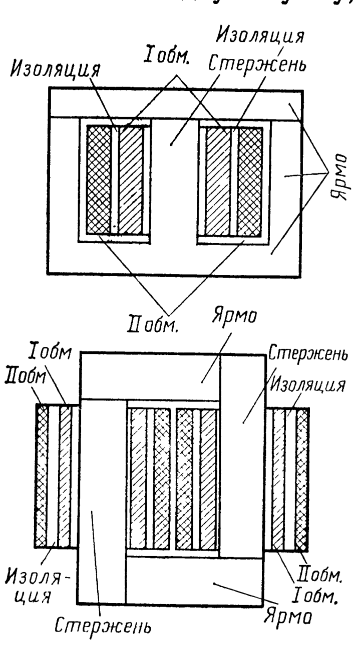


Рис. 5. Расположение обмоток на трансформаторах броневого и стержневого типов.

Обмотки наматываются на гильзу или на каркас из электроизоляционного материала. У очень малых транс-

2* Таблица 3

Параметры некоторых кольцевых магнитопроводов для трансформаторов преобразователей

Тип магнитопровода	D, см	d, см	c, см	$\frac{D-d}{2}$, см	Средняя длина магнитной линии l_c, см	Средняя длина витка $l_м$, см	Сечение Q_c, см²	Площадь окна Q_o, см²	Q_cQ_o, см⁴	Объем магнитопровода v_c, см³
ОЛ12/14-3	1,4	1,2	0,3	0,1	4,1	2,7	0,03	1,13	0,034	0,123
ОЛ14/17-3	1,7	1,4	0,3	0,15	4,86	3,1	0,045	1,54	0,069	0,219
ОЛ16/20-3	2,0	1,6	0,3	0,2	5,65	3,5	0,05	2,0	0,121	0,339
ОЛ18/23-4	2,3	1,8	0,4	0,25	6,45	4,1	0,1	2,55	0,25	0,646
ОЛ20/25-5	2,5	2,0	0,5	0,25	7,1	4,6	0,125	3,14	0,39	0,884
ОЛ20/25-6,5	2,5	2,0	0,65	0,25	7,1	4,9	0,162	3,14	0,51	1,15
ОЛ20/28-5	2,8	2,0	0,5	0,4	7,55	4,9	0,2	3,14	0,63	1,51
ОЛ22/30-5	3,0	2,2	0,5	0,4	8,2	5,3	0,2	3,82	0,765	1,63
ОЛ22/30-6,5	3,0	2,2	0,65	0,4	8,2	5,6	0,26	3,82	0,99	2,12
ОЛ25/35-5	3,5	2,5	0,5	0,5	9,42	5,9	0,25	4,9	1,23	2,36
ОЛ25/35-6,5	3,5	2,5	0,65	0,5	9,42	6,2	0,325	4,9	1,6	3,06
ОЛ25/40-5	4,0	2,5	0,5	0,75	10,2	6,4	0,375	4,9	1,84	3,83
ОЛ25/40-6,5	4,0	2,5	0,65	0,75	10,2	6,7	0,49	4,9	2,4	4,97
ОЛ28/40-8	4,0	2,8	0,8	0,6	10,7	7,2	0,48	6,1	2,95	5,13
ОЛ28/40-10	4,0	2,8	1,0	0,6	10,7	7,6	0,6	6,1	3,7	6,41
ОЛ32/45-8	4,5	3,2	0,8	0,65	12,1	7,9	0,52	8,0	4,15	6,29
ОЛ32/50-8	5,0	3,2	0,8	0,9	12,9	8,4	0,72	8,0	5,7	9,29
ОЛ36/56-10	5,6	3,6	1,0	1,0	14,4	9,7	1,0	10,2	10,2	14,52
ОЛ40/56-16	5,6	4,0	1,6	0,8	15	11,1	1,28	12,5	16	19,47

форматоров намотку производят непосредственно на магнитопровод, изолированный стеклослюдинитом. Каркас, на котором располагаются обмотки трансформатора, должен быть электрически и механически прочным. Материал, из которого делается каркас, должен хорошо обрабатываться и быть негигроскопичным. Простейшим материалом, часто применяемым для этой цели, является электротехнический картон; часто используют гетинакс, текстолит, различные пластмассы. При изготовлении каркаса из пластмассы его прессуют целиком. Пластмасса для каркасов должна быть механически прочной и нехрупкой. Прессованные каркасы из пластмассы применяются только при массовом производстве.

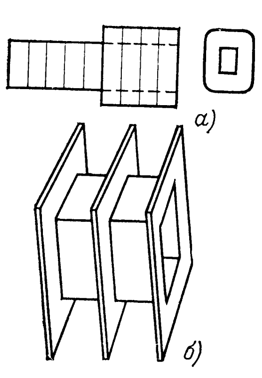


Рис. 6. Изготовление каркаса из картона. Выкройка гильзы каркаса и пластинка щеки.

Каркасы из твердых листовых изоляционных материалов (гетинакс, текстолит) обычно делают сборными из отдельных частей, которые легко штамповать. После сборки такой каркас склеивать не нужно, и намотка обмоток на него производится сразу после сборки. Сборные каркасы удобны для трансформаторов малых и средних размеров с прямоугольным сечением стержня.

При изготовлении каркаса из электротехнического картона вначале из листа картона нужной толщины (0,3—0,5 мм) по выкройке особой формы (рис. 6, *а*) вырезается заготовка для гильзы каркаса, которая затем свертывается и проклеивается. Верхний слой делается длиннее и надрезается по краям на углах. На проклеенную гильзу надевают два прямоугольника из картона или другого материала, имеющих форму щеки, и, отогнув надрезанные края гильзы и промазав их клеем, закладывают кусочки картона в образовавшиеся между отогнутыми краями гильзы промежутки. Проклеив вложенные кусочки, накладывают снаружи еще пластинку, имеющую форму щеки, прессуют полученные щеки и сушат каркас. Щеки на таком каркасе держатся очень прочно, так как удерживаются на месте вклеенным внутрь наружным слоем материала гильзы.

При повышенных напряжениях вторичных обмоток (свыше 1 кВ) каркас рекомендуется делать двухсекционным. В этом случае кроме двух крайних щек надевается еще одна — средняя щека. После прессовки крайних щек одним-двумя оборотами тонкой картонной полоски нужной ширины, намотанной на гильзу между крайними и средней щеками, закрепляют последнюю на гильзе (рис. 6, *б*).

Для склеивания каркаса, а также для приклейки щек к гильзе следует применять негигроскопичные нейтральные клеящие составы, не содержащие кислот, щелочей и минеральных солей. Присутствие этих соединений резко снижает электросопротивление клея, его электрическую прочность и вызывает коррозию провода обмоток.

Пригодными для склеивания являются нейтральные клеи марок БФ-2 и БФ-4, обладающие высокой клеящей способностью, хорошей влагостойкостью и удовлетворительными изоляционными свойствами. Для каркасов высоковольтных трансформаторов предпочтительнее пользоваться бакелитовыми и эпоксидными смолами, которые после полимеризации дают склейку с высокой механической и электрической прочностью. Столярный клей вследствие высокой гигроскопичности и низкой электрической прочности для склейки каркасов применять не следует. После склейки каркас необходимо хорошо просушить или подвергнуть термообработке для полимеризации клея, если этого требует примененный клеящий состав.

Для того чтобы трансформатор имел необходимую электрическую прочность, толщина гильзы и щек каркаса, а также междуобмоточной изоляции должна соответствовать рабочему напряжению. Наименьшая толщина гильзы, щек и изоляции между обмотками, необходимая для получения достаточной электрической прочности, приведена в табл. 4, составленной на основании практических данных для сухих трансформаторов (без масляной изоляции).

Приведенные в табл. 4 данные для напряжений до 3 кВ включительно относятся к сухим трансформаторам с изоляцией из твердых изолирующих материалов типа бумаги и электротехнического картона. Применение высококачественных изолирующих материалов (например, лакоткани) и последующая пропитка готовой катушки под вакуумом изолирующими лаками или компаундами

Таблица 4

Минимальные толщины изоляционных промежутков для сухих трансформаторов с каркасами из электротехнического картона

Рабочее напряжение вторичной обмотки, В	Толщина изоляции между обмотками, мм	Толщина гильзы, мм	Толщина щек, мм
До 250	0,3—0,5	1—1,5	2—3
250—500	0,5—0,8	1,5—2	3—4
500—1000	0,8—1,3	2—2,5	4—5
1000—2000	1,3—2	2,5—3,0	5—6
2000—3000	2—3	3,0—4,0	6—8

позволяют уменьшить толщину междуобмоточной изоляции в 1,5—2 раза по сравнению со значениями, указанными в табл. 4.

При высоких вторичных напряжениях (выше 3—5 кВ) обмотки обычно наматываются на двух каркасах с воздушным зазором между ними. Низковольтную обмотку располагают на внутреннем каркасе, который надевается на стержень магнитопровода. Высоковольтная обмотка располагается на наружном каркасе, который закрепляется поверх обмотки низкого напряжения с помощью клиньев из изоляционного материала (например, из гетинакса). При более высоких напряжениях собранный таким способом трансформатор помещают в бак с трансформаторным маслом, которое, заполняя зазор между обмотками, повышает электрическую прочность трансформатора.

Одним из лучших материалов для щек высоковольтных трансформаторов является листовой гетинакс, из которого штампуются или вытачиваются щеки. Можно применять также и картон, пропитанный изолирующим компаундом или лаком.

Толщина гильзы каркаса обмотки низкого напряжения, а также толщина гильзы одного общего каркаса, на котором наматываются все обмотки, определяется лишь необходимой механической прочностью и колеблется от 0,5 мм для очень малых трансформаторов до 3—4 мм для трансформаторов большого размера.

В небольших трансформаторах электропитания широко применяют бескаркасную намотку обмоток. При этом способе обмотки наматываются не на каркас со щечками, а на гильзу из изоляционного материала, не имеющую боковых щечек. На рис. 7 показан многообмо-

точный трансформатор броневой конструкции, собранный на ленточном разрезном магнитопроводе с бескаркасной намоткой; трансформатор показан непосредственно после сборки до пропитки и заливки компаундом; катушка трансформатора обмотана электроизоляционной бумагой. Такой способ намотки позволяет механизировать и автоматизировать как процесс изготовления

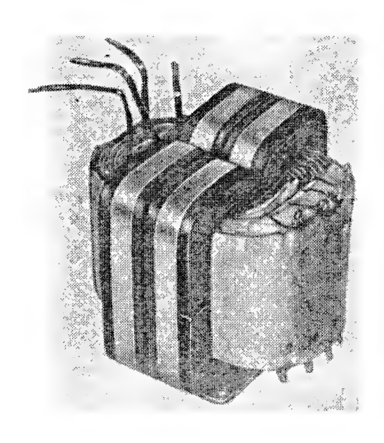


Рис. 7. Трансформатор с бескаркасной катушкой.

◀

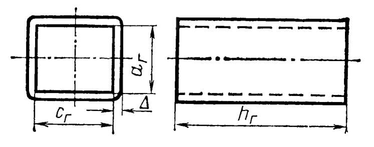


Рис. 8. Гильза для бескаркасной намотки.

гильзы, так и самую намотку, а поэтому очень удобен для массового производства.

Гильзу для бескаркасной намотки обычно делают на специальном автоматическом станке из рулона бумажной либо картонной ленты или из ленты электротехнического картона. Станок покрывает эту ленту клеем и свертывает из нее бесконечную круглую трубку, наматывая ленту наискосок на оправку нужного диаметра. Ширину ленты и угол ее намотки подбирают так, чтобы полученная трубка имела толщину стенок в 2—3 слоя ленты. Трубка режется станком на куски небольшой длины (1—2 м). Отрезки трубки еще до окончательной просушки поступают на обжимку, где им придается квадратная или прямоугольная форма, соответствующая сечению магнитопровода трансформатора, для которого они предназначаются. После обжимки и просушки трубки режутся на куски нужной длины, на которые на специальных намоточных станках производят одновременную намотку нескольких бескаркасных катушек для трансформаторов. В табл. 5 и на рис. 8 даны размеры

Таблица 5

Размеры гильз для магнитопроводов броневого типа при бескаркасной намотке

Тип магнитопровода	$a_г$, мм	$c_г$, мм	$h_г$, мм	Толщина гильзы Δ, мм
Ш6×6,5	6,5	7,5	14,5	0,7
Ш6×8		9		
Ш6×10		11		
Ш6×12,5		13,5		
Ш8×8	8,5	9	19,5	0,7
Ш8×10		11		
Ш8×12,5		13,5		
Ш8×16		17		
Ш10×10	10,5	11	24,5	0,8
Ш10×12,5		13,5		
Ш10×16		17		
Ш10×20		21		
Ш12×12,5	12,8	13,5	29,5	0,8
Ш12×16		17		
Ш12×20		21		
Ш12×25		26		
Ш16×16	16,8	17	39,5	0,8
Ш16×20		21		
Ш16×25		26		
Ш16×32		33		
Ш20×20	20,8	21	49,5	1
Ш20×25		26		
Ш20×32		33		
Ш20×40		41		
Ш25×25	26	26	62	1,5
Ш25×32		33		
Ш25×40		41		
Ш25×50		51		
Ш32×32	33	33	79,5	2
Ш32×40		41		
Ш32×50		51		
Ш32×64		65		
Ш40×40	41	41	99,5	2
Ш40×50		51		
Ш40×64		65		
Ш40×80		81		

гильз для магнитопроводов броневой конструкции при бескаркасной намотке. Наматывать провод на каркас можно двумя способами: не следя за укладкой отдельных витков, беспорядочно, и укладывая провод виток к витку правильными рядами, как наматываются нитки на катушке. Первый способ намотки называется намоткой вразброс, второй способ — намоткой в слой или виток к витку.

Намотка вразброс несмотря на ее простоту и дешевизну при диаметрах провода выше 0,4—0,5 мм почти не применяется, да и при малых диаметрах применяется редко. Причина этого заключается в том, что при больших диаметрах провода намотка вразброс дает малый коэффициент заполнения окна магнитопровода, так как толстый провод при такой намотке ложится неравномерно и беспорядочно. При малых же диаметрах провода в трансформаторах питания почти всегда применяется провод с эмалевой изоляцией, который при намотке вразброс нередко образует короткозамкнутые витки, что приводит к выходу трансформатора из строя. Чем выше напряжение обмотки, тем вероятнее образование короткозамкнутых витков при намотке, поэтому намотка вразброс может иногда применяться в малых трансформаторах с небольшим рабочим напряжением при проводах малых диаметров с высокопрочной эмалевой изоляцией (ПЭВ) в тех случаях, когда это упрощает технологию изготовления трансформаторов. Для уменьшения возможности короткого замыкания витков и удаления друг от друга витков со значительной разностью потенциалов намотку вразброс при цилиндрической конструкции обмоток ведут отдельными толстыми слоями, слегка покачивая наматываемый проводник в горизонтальном направлении и передвигая его постепенно от одного края катушки к другому. Каждый такой слой изолируют, оборачивая его 1—2 раза тонкой бумажной лентой или микалентной бумагой, и производят намотку следующего слоя, передвигая провод в обратном направлении (рис. 9).

При бескаркасной намотке слой провода не должен доходить до края изолирующей прокладки на 2—6 мм в зависимости от размеров катушки; это необходимо для защиты провода обмотки от механических повреждений и для того, чтобы крайние витки слоя не сползали. При малых диаметрах провода и достаточно плотных изоля-

ционных прокладках расстояние до края может быть одинаковым как для нижних, так и для верхних слоев (рис. 10, *а*). При более толстом проводе расстояние от края в верхних слоях приходится делать больше, укладывая слои пирамидкой, чтобы прокладки не продавливались проводом у края слоя и крайние витки не соскакивали при намотке (рис. 10, *б*).

При каркасной намотке слой провода следует доводить до щеки каркаса, но ширину изоляционных прокла-

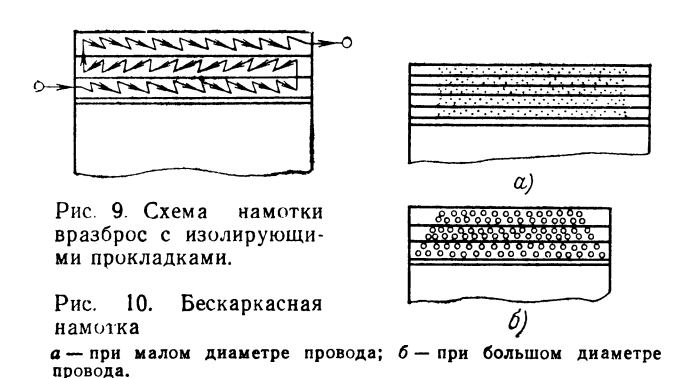


Рис. 9. Схема намотки вразброс с изолирующими прокладками.

Рис. 10. Бескаркасная намотка

а — при малом диаметре провода; *б* — при большом диаметре провода.

док желательно брать немного больше расстояния между щеками, делая с обеих сторон прокладок частые надрезы небольшой длины. Такие прокладки после намотки провода не оставляют щели у щеки каркаса, что уменьшает возможность западания витков верхних слоев в нижние и уменьшает вероятность появления короткозамкнутых витков. Общее количество прокладок на одну обмотку при намотке вразброс обычно лежит в пределах от 2 до 10 в зависимости от количества витков обмотки и ее рабочего напряжения.

Слоевая намотка (виток к витку) ведется обычно на станке, что позволяет автоматизировать процесс такой намотки, так как она обеспечивает наилучшее использование (заполнение) окна магнитопровода. Между слоями обмотки прокладывается один или несколько слоев специальной изолирующей бумаги, что предохраняет обмотку от межвитковых пробоев и облегчает процесс намотки, удерживая провод от сползания. Обмотки также изолируются между собой несколькими слоями подобной

Таблица 6

Некоторые электроизоляционные материалы, применяемые при намотке катушек трансформаторов

Наименование	ГОСТ	Марка	Толщина, мм	Пробивное напряжение, В
Бумага конденсаторная	1908-77	КОН-1	0,01—0,03	360—620
		КОН-2	0,004—0,03	40—680
Бумага телефонная	3553-73	КТ-50	0,05	—
Бумага кабельная	645-67	К-080	0,08	—
		К-120	0,12	—
Бумага электроизоляционная намоточная	1931-75	ЭН-50	0,05	450
		ЭН-70	0,07	630
		ЭН-100	0,1	750
Бумага электроизоляционная пропиточная	3441-77	ЭИП-50	0,12	600
Бумага микалентная	6500-64	—	0,02	—
Картон электроизоляционный	2824-75	ЭВ	0,1—3,0	—
	4194-68	Б	1,0—3,0	—
	4194-68	Г	0,5	—

бумаги, толщина которой выбирается в зависимости от напряжения между обмотками.

В качестве изоляционных прокладок между слоями и группами слоев в трансформаторах применяют прочную, не содержащую посторонних вкраплений бумагу. При намотке проводов малых диаметров (около 0,05—0,1 мм) в качестве прокладки применяют конденсаторную бумагу толщиной 0,008—0,025 мм. При намотке более толстых проводов (0,15—0,3 мм) прокладку обычно делают из телефонной бумаги толщиной 0,05—0,07 мм, а при намотке толстых проводов (более 0,3 мм) применяют прокладки из кабельной бумаги толщиной 0,08; 0,12 и 0,17 мм. В табл. 6 приведены данные некоторых электроизоляционных материалов, применяемых при намотке катушек трансформаторов.

Выводы наружных концов обмоток трансформатора при диаметре провода не менее 0,2—0,5 мм можно делать проводом самой обмотки. Однако во избежание обламывания выводных концов при сборке трансформатора выводы лучше делать многожильным гибким изолированным проводом малого диаметра. Выводной проводник должен быть обернут 1—2 раза вокруг катушки, надежно припаян к проводу обмотки, а пайка должна

быть хорошо изолирована сложенной пополам полоской бумаги или тонкой лакоткани, заклеенной изолирующим лаком. Пайку выводных концов следует делать хорошим припоем с достаточным содержанием олова и с бескислотным флюсом, например хорошей канифолью. Применение паяльного жира или кислотных флюсов недопустимо, так как приводит к окислению мест пайки через некоторое время, а при тонких проводах — даже к разрушению провода в месте пайки. Для того чтобы выводные концы не могли выдернуться при случайном натяжении, они должны быть надежно привязаны к катушке трансформатора несколькими оборотами прочной нитки. Для изоляции и механической защиты выводных проводников на них обычно надевают тонкую трубку из изолирующего материала, например из хлорвинила. Резиновые трубки для этой цели применять не следует, так как сера, содержащаяся в вулканизированной резине, образует на поверхности провода сернистую медь и проникает вглубь, делая провод ломким и хрупким.

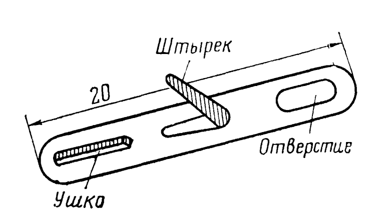


Рис. 11. Конструкция выводного «лепестка».

Концы обмоток малых трансформаторов при слоевой намотке на каркасе выводят через заранее заготовленные в щеках каркаса отверстия, расположенные так, чтобы было удобно произвести необходимые соединения и включить трансформатор во внешнюю схему. После сборки трансформатора и соединения концов его катушек те соединения, которые не включаются во внешнюю цепь, изолируют (например, куском хлорвиниловой трубки), а соединения, включаемые в схему, присоединяют к выводным приспособлениям (например, к штырькам, размещенным на щеках каркаса), позволяющим легко и надежно осуществить соединение между выводным проводником и монтажным проводом схемы. В малых трансформаторах с бескаркасной намоткой это осуществляют при помощи латунных облуженных «лепестков», одна из конструкций которых показана на рис. 11. Отверстие на «лепестке» служит для закрепления и подпайки монтажного провода от внешней схемы; штырек

предназначен для подпайки выводного проводника обмотки; в ушко «лепестка» продевается бумажная или хлопчатобумажная лента, которую затем приклеивают к поверхности обмотки, обеспечивая крепление «лепестка». Обычно одна лента крепит несколько выводных «лепестков».

Трансформаторы с кольцевыми неразрезными магнитопроводами, применяемые в основном в транзисторных преобразователях напряжения, называются тороидальными. Обмотки в таких трансформаторах наматывают на пластмассовую коробку, в которой помещается магнитопровод. Коробку предварительно обматывают изолирующей лентой или обволакивают компаундом, которые не пропускают в коробку пропиточных материалов, ухудшающих магнитные свойства пермаллоевых магнитопроводов. Для намотки таких трансформаторов существуют специальные станки, позволяющие производить слоевую намотку проводом диаметром не более 0,35 мм. Провода большего диаметра наматывают вручную.

Для обмоток трансформаторов питания чаще всего применяются провода круглого или прямоугольного сечения с высокопрочной эмалевой изоляцией марки ПЭВ. Провода прямоугольного сечения (например, марки ПЭТВП) применяют только при больших токах обмоток (свыше 15—20 А). В некоторых случаях при высоких рабочих напряжениях применяют провода с комбинированной изоляцией: с эмале-шелковой (ПЭШО, ПЭШД) и с эмале-хлопчатобумажной (ПЭБО, ПЭБД). Такая изоляция повышает электрическую прочность обмоток, но уменьшает коэффициент заполнения окна магнитопровода. В табл. 7 приведены стандартные диаметры проводов марки ПЭВ, выпускаемых промышленностью; диаметры проводов даны без изоляции.

Если провода прямоугольного сечения отсутствуют, можно использовать круглые провода меньшего сечения, при этом наматывают две или более обмоток из одинакового круглого провода с одинаковым числом витков, равным расчетному. Суммарное сечение проводов этих обмоток должно быть возможно ближе к расчетному; все эти одинаковые обмотки соединяют параллельно.

После намотки катушки и закрепления выводов на лепестках (или на других выводных приспособлениях) катушка обычно обматывается несколькими слоями изоляционной бумаги или хлопчатобумажной ленты для

Таблица 7

Провод обмоточный медный эмалированный марки ПЭВ-2 (по ГОСТ 7262-78)

Диаметр провода без изоляции, мм	Сечение, мм²	Сопротивление 100 м провода, Ом	Диаметр провода без изоляции, мм	Сечение, мм²	Сопротивление 100 м провода, Ом
0,050	0,00196	878	0,750	0,442	3,90
0,063	0,00312	553	0,800	0,503	3,43
0,071	0,00396	436	0,850	0,567	3,04
0,080	0,00503	343	0,900	0,636	2,71
0,090	0,00636	271	0,950	0,709	2,43
0,100	0,00785	220	1,000	0,785	2,20
0,112	0,00985	175	1,06	0,882	1,95
0,125	0,0123	143	1,12	0,985	1,75
0,140	0,0154	112	1,18	1,094	1,58
0,160	0,0201	85,8	1,25	1,227	1,41
0,180	0,0254	67,8	1,32	1,368	1,26
0,200	0,0314	54,9	1,40	1,539	1,12
0,224	0,0394	43,8	1,50	1,767	0,976
0,250	0,0491	35,1	1,60	2,011	0,858
0,280	0,0616	28,0	1,70	2,269	0,760
0,315	0,0779	22,1	1,80	2,545	0,678
0,355	0,0989	17,4	1,90	2,835	0,608
0,400	0,126	13,7	2,00	3,142	0,549
0,450	0,159	10,8	2,12	3,529	0,489
0,500	0,196	8,78	2,24	3,941	0,438
0,560	0,246	7,00	2,36	4,374	0,430
0,630	0,312	5,53	2,50	4,909	0,351
0,710	0,396	4,36			

Провода прямоугольного сечения — см. ГОСТ 17708-72.

защиты от механических повреждений и для улучшения электрической изоляции.

Для придания влагостойкости и создания монолитности катушки после намотки пропитываются специальными лаками и компаундами (например, марки ЭД-6). Высоковольтные трансформаторы (с напряжением несколько тысяч вольт) помещают целиком в трансформаторное масло, которое является хорошим изолятором, предохраняющим от пробоев, и одновременно хорошим проводником теплоты, улучшающим охлаждение трансформатора.

Для защиты трансформаторов от внешних воздействий (влаги, инея, росы, тумана, пыли) принимают раз-

личные меры в зависимости от интенсивности и продолжительности этих воздействий. При наиболее тяжелых внешних условиях применяют вакуумную герметизацию, при которой катушку и магнитопровод помещают в металлический кожух и заливают компаундом. Для менее трудных условий работы производят обволакивание (капсулирование) всего трансформатора слоем компаунда толщиной 1—3 мм. Для уменьшения массы можно покрывать компаундом не всю поверхность трансформатора, а защищать только наиболее уязвимые места — торцы катушек, места выхода контактов, зазоры между магнитопроводом и катушкой. Остальные поверхности покрывают влагостойкой эмалью и покровным лаком.

Для аппаратуры, работающей в комнатных условиях, достаточно пропитать катушку или весь трансформатор специальным лаком, обеспечивающим защиту, достаточную для этих условий. Все способы защиты трансформаторов от внешних воздействий одновременно обеспечивают монолитность, а следовательно, и нужную механическую прочность конструкции.

На рис. 12 и 13 показаны некоторые типы маломощных многообмоточных трансформаторов, изготовляемых промышленностью. Трансформаторы, показанные на рис. 12, *а—в*, выполнены на разрезных ленточных магнитопроводах с бескаркасной намоткой и с выводами на лепестки. Они защищены от внешних воздействий с помощью компаунда, нанесенного на поверхность методом обволакивания. Трансформатор на рис. 12, *в* выполнен на магнитопроводе стержневого типа с двумя катушками; остальные трансформаторы имеют магнитопроводы броневого типа. Трансформаторы на рис. 12, *г*, *д* конструктивно совмещены с радиаторами (теплоотводами), которые плотно соприкасаются с магнитопроводом и катушкой. Такая конструкция дает возможность снизить превышение температуры трансформатора в 1,5—2 раза (или увеличить мощность трансформатора при сохранении температуры).

У трансформаторов, приведенных на рис. 13, *а*, *б*, также выполненных на ленточных разрезных магнитопроводах, компаундом (специальной шпатлевкой) защищены только торцы катушек и зазоры между магнитопроводом и катушкой. Трансформатор на рис. 13, *в*, предназначенный для легких условий работы, выполнен

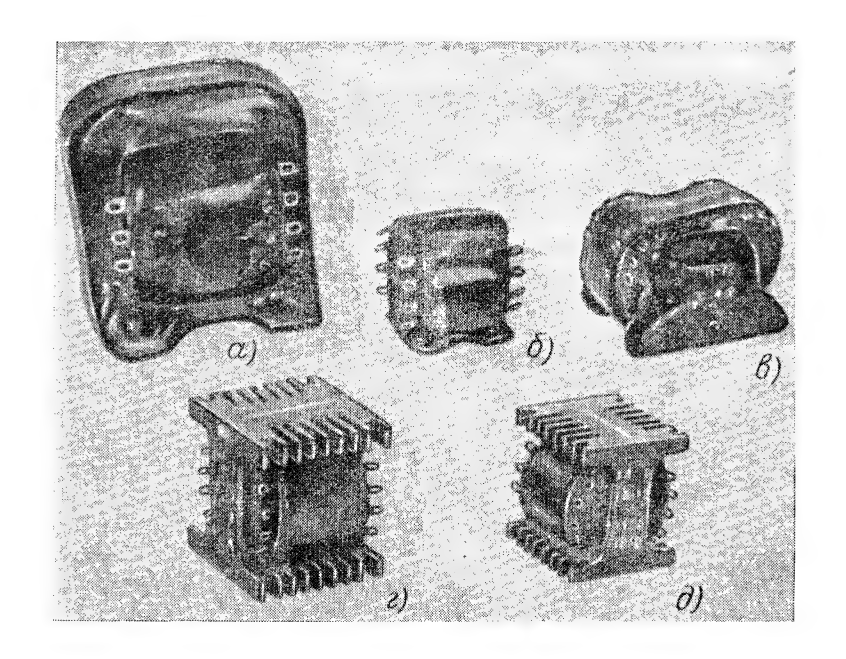


Рис. 12. Трансформаторы броневой и стержневой конструкции.

с магнитопроводом из штампованных пластин и имеет открытую конструкцию с катушкой, пропитанной специальным лаком.

На рис. 13, *г*, *д* показаны многообмоточные тороидальные трансформаторы, помещенные в стальные экраны; выводы обмоток сделаны на специальные штырьки. Экраны защищают близко расположенную радиоаппаратуру от помех, создаваемых такими трансформаторами, которые обычно работают на повышенных частотах.

Представляет интерес необычная конструкция маломощного трансформатора, позволяющая уменьшить его высоту до 4—10 мм, при этом трансформатор хорошо вписывается в конструкцию, содержащую интегральные микросхемы. Такой трансформатор имеет магнитопровод в виде нескольких полых цилиндров, внутри которых размещены обмотки. Каждая обмотка состоит из соединенных между собой проводов, проложенных вдоль осей цилиндров, образующих магнитопроводы; последние изготовляют в виде витых неразрезных сердечников из ши-

Рис 13. Трансформаторы броневой и тороидальной конструкции.

рокой пермаллоевой ленты или из прессованных порошкообразных материалов (ферритов). Трансформаторы описанной конструкции получили название трансформаторов кабельного типа. Они нашли применение при мощностях до 10—15 Вт при повышенных частотах сети (до 50 кГц). На рис. 14 схематически показано устройство трансформатора кабельного типа.

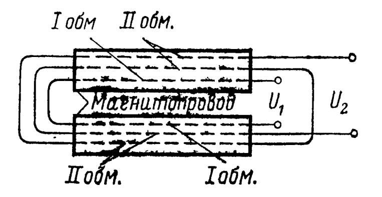


Рис. 14. Устройство трансформатора кабельного типа.

ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Для полного расчета трансформатора необходимо выполнить сначала электрический, а затем конструктивный расчеты.

Электрический расчет заключается в выборе схемы трансформатора, определении напряжений и токов об-

моток, нахождении коэффициентов трансформации мощности обмоток и габаритной мощности трансформатора. После конструктивного расчета уточняются падения напряжения в обмотках и потери в магнитопроводе и в меди, которые на этапе электрического расчета определяются приближенно.

Коэффициентом трансформации трансформатора n называется отношение числа витков вторичной обмотки w_2 к числу витков первичной обмотки w_1. Если трансформатор имеет несколько вторичных обмоток, то различают несколько коэффициентов трансформации: n_2, n_3, n_4..., определяемых как отношение чисел витков соответствующих обмоток w_2, w_3, w_4... к числу витков первичной обмотки. На основании первого основного закона трансформации (2) можно представить коэффициенты трансформации как отношения соответствующих ЭДС:

$$n_2 = \frac{w_2}{w_1} = \frac{E_2}{E_1}; \quad n_3 = \frac{w_3}{w_1} = \frac{E_3}{E_1}; \quad n_4 = \frac{w_4}{w_1} = \frac{E_4}{E_1} \ldots \quad (5)$$

В тех случаях, когда значения ЭДС неизвестны, можно воспользоваться приближенными формулами, имея в виду, что ЭДС мало отличается от напряжения обмотки (1):

$$n_2 \approx \frac{U_2}{U_1}; \quad n_3 \approx \frac{U_3}{U_1} \ldots \quad (5а)$$

В соответствии со вторым основным законом трансформации (4) можно получить следующее соотношение между токами первичной и вторичной обмоток:

$$I_1 \approx I_2 n_2. \quad (6)$$

Знак приближенного равенства поставлен в (6) потому, что в этом выражении не учитывается ток холостого хода трансформатора. Если трансформатор имеет несколько вторичных обмоток, то ток первичной обмотки состоит из суммы токов, вызванных токами каждой вторичной обмотки:

$$I_{1общ} \approx I_{1,2} + I_{1,3} + I_{1,4} + \ldots = I_2 n_2 + I_3 n_3 + I_4 n_4 + \ldots \quad (7)$$

В выражении (7) также не учитывается ток холостого хода.

Сопоставляя выражения (5) и (7), легко получить известное соотношение

$$I_{1общ} E_1 \approx I_2 E_2 + I_3 E_3 + I_4 E_4 + \ldots \quad (8)$$

Учитывая (1), можно записать

$$I_{1общ}U_1 \approx I_2U_2 + I_3U_3 + I_4U_4 + \ldots \quad (8а)$$

Выражения (8) или (8а) формулируются следующим образом: мощность первичной обмотки равна сумме мощностей всех вторичных обмоток (без учета тока холостого хода).

Здесь необходимо сделать важную оговорку. Выражение (8) справедливо, когда форма тока первичной обмотки совпадает с формой тока вторичной обмотки (или с формой, полученной в результате суммирования токов всех вторичных обмоток). Это условие выполняется при нагрузке вторичных обмоток на линейные цепи, например на цепи накала ламп, на нагревательные приборы, на двигатели переменного тока.

Если же формы токов первичной и вторичной обмоток не совпадают, то мощности этих обмоток, как правило, не равны между собой. Различная форма токов в обмотках может наблюдаться в тех случаях, когда в цепь вторичной (или первичной) обмотки включены нелинейные элементы, в частности приборы с односторонней проводимостью, — диоды, тиристоры, транзисторы. Поэтому у трансформаторов, работающих в некоторых (но не во всех!) схемах выпрямителей и транзисторных преобразователей, мощности первичной и вторичной обмоток отличаются друг от друга.

Трансформаторы характеризуются мощностью, которую они могут передать в нагрузку. Эта мощность измеряется в вольт-амперах, а не в ваттах по следующей причине. Как известно, мощность в ваттах определяется произведением напряжения на силу тока и на косинус угла сдвига фаз между ними: $P=U_2I_2\cos\varphi$. Если нагрузка кроме активного сопротивления содержит индуктивность или емкость, то $\cos\varphi$ будет меньше единицы и действительная мощность (в ваттах), выделяемая в нагрузке, будет меньше произведения U_2I_2. Однако обмотка трансформатора, имеющая напряжение U_2, будет при этом нагружена током I_2, независимо от значения $\cos\varphi$. Иначе говоря, трансформатор может отдать в нагрузку ток I_2 при напряжении U_2 независимо от того, какова будет действительная мощность, выделяемая в нагрузке. Поэтому произведение U_2I_2, называемое полной мощностью и измеряемое в вольт-амперах (В·А), характеризует трансформатор с точки зре-

ния мощности, которую он может отдать в нагрузку.

Габаритные размеры трансформатора зависят от так называемой габаритной мощности трансформатора, которая равна полусумме мощностей всех его обмоток:

$$P_{габ} = \frac{1}{2}(U_1 I_{1общ} + U_2 I_2 + U_3 I_3 + \ldots). \qquad (9)$$

Очевидно, что если трансформатор имеет две обмотки, мощности которых равны между собой, то габаритная мощность такого трансформатора будет равна мощностям первичной или вторичной обмоток:

$$P_{габ} = U_1 I_1 = U_2 I_2. \qquad (9а)$$

Если трансформатор имеет отводы от первичной обмотки (например, для включения в сеть 127 или 220 В) или от вторичных обмоток, то для расчета габаритной мощности в (9) следует подставлять мощности всех частей обмоток, находящихся между отводами трансформатора, независимо от того, работают ли они в данном случае или нет.

Конструктивный расчет трансформатора заключается в выборе магнитопровода и определении чисел витков обмоток и диаметров проводов.

Основное соотношение, связывающее число витков с напряжением и другими параметрами трансформатора, имеет вид:

$$w = \frac{E \cdot 10^4}{4,44 f B Q_c k_c}. \qquad (10)$$

где f — частота питающей сети, Гц; B — магнитная индукция в магнитопроводе, Тл; Q_c — полное сечение стержня магнитопровода, см^2: k_c — коэффициент заполнения магнитопровода сталью.

Индукция B представляет собой число линий магнитного потока, Ф, проходящих через один квадратный сантиметр сечения магнитопровода; единицей магнитной индукции является тесла (Тл). Значения B выбирают чаще всего в пределах от 0,8 до 1,2 Тл. Чем больше мощность трансформатора, тем меньшее значение индукции надо выбирать. Значения B в зависимости от некоторых параметров трансформатора приводятся в табл. 8. Увеличение индукции B свыше рекомендуемых значений ведет к перегреву трансформатора.

Таблица 8

Рекомендуемые значения индукции, плотности тока, КПД и коэффициента заполнения окна

Габаритная мощность $P_{габ}$, В·А	Индукция B, Тл		Плотность тока J, А/мм²		КПД η		Коэффициент заполнения окна $k_м$
	Частота сети		Частота сети		Частота сети		
	50 Гц	400 Гц	50 Гц	400 Гц	50 Гц	400 Гц	
10	1,10	1,0	4,8	7	0,82	0,80	0,23
20	1,25	1,1	3,9	6	0,85	0,83	0,26
40	1,35	1,2	3,2	5	0,87	0,85	0,28
70	1,40	1,25	2,8	4,2	0,89	0,87	0,3
100	1,35	1,2	2,5	3,8	0,91	0,89	0,31
200	1,25	1,1	2	3,1	0,93	0,91	0,32
400	1,15	1,0	1,6	2,5	0,95	0,92	0,33
700	1,10	0,9	1,3	2,1	0,96	0,93	0,33
1000	1,05	0,8	1,2	1,8	0,96	0,93	0,34

Примечание. При $f=50$ Гц обычно используется электротехническая сталь толщиной 0,35—0,5 мм, а при $f=400$ Гц 0,08—0,2 мм. Технические характеристики электротехнической стали даны в ГОСТ 21427.0(1,2,3)-75 и ГОСТ 21427 4-78.

Коэффициент $k_м$ дан для проводов с эмалевой изоляцией; для проводов с шелковой или хлопчатобумажной изоляцией $k_м$ снижается в 1,2—1,5 раза.

Сечение стержня $Q_с$ определяют как произведение ac для магнитопроводов стержневого и броневого типов и как $(D—d)\frac{c}{2}$ для кольцевых магнитопроводов (см. рис. 3).

Коэффициент заполнения магнитопровода сталью $k_с$ показывает, какую часть полного сечения стержня $Q_с$ занимает магнитный материал (сталь). Имеется в виду, что остальная часть сечения приходится на изоляцию пластин или ленты. Для трансформаторов из материала толщиной не менее 0,08 мм $k_с=\frac{Q_{стали}}{Q_с}=0,85\div0,95$; для кольцевых магнитопроводов из тонкой ленты $k_с= =0,7\div0,75$.

Из выражения (10) можно сделать некоторые важные выводы. Во-первых, число витков w пропорционально ЭДС соответствующей обмотки E; во-вторых, чем больше частота сети f и сечение стержня магнитопровода $Q_с$, тем меньше витков будут иметь обмотки. Для трансформаторов питания, работающих от сети с часто-

той 50 Гц, формулу (10) можно значительно упростить:

$$w \approx 45 \frac{E}{Q_c}. \tag{10a}$$

Так как при расчете трансформатора обычно задают напряжение обмоток U, а не ЭДС E, то в первом приближении можно воспользоваться выражениями:

$$\left.\begin{aligned} &\text{для первичной обмотки } E_1 \approx 0{,}95U_1; \\ &\text{для вторичных обмоток } E_2 \approx 1{,}05U_2. \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

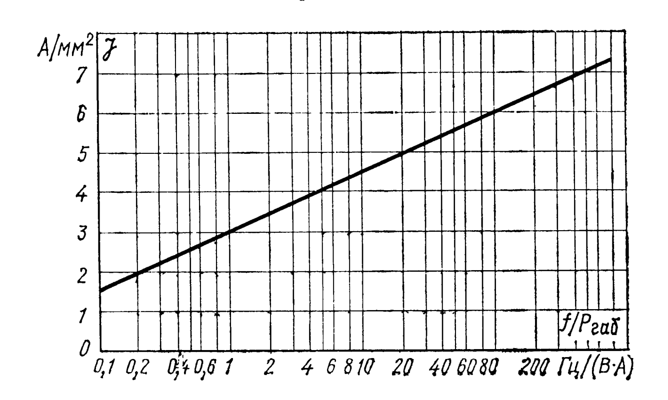


Рис. 15. График зависимости плотности тока в обмотках J от отношения $f/P_{габ}$ для трансформаторов преобразователей.

Диаметр проводов, мм, обмоток (без изоляции) определяют из выражения

$$d = 1{,}13 \sqrt{\frac{I}{J}}, \tag{12}$$

где J — плотность тока в обмотках, измеряемая в амперах на квадратный миллиметр сечения провода (без изоляции). Значения допустимых плотностей тока J, зависящие от мощности трансформатора питания и других его параметров, приводятся в табл. 8. Значение допустимой плотности тока для тороидального трансформатора, работающего в схемах транзисторных преобразователей, в зависимости от отношения частоты преобразователя к габаритной мощности трансформатора дано на графике рис. 15. При увеличении плотности тока свыше допустимой трансформатор будет перегреваться. Для маломощ-

ных трансформаторов, работающих от сети с частотой 50 Гц, можно воспользоваться приближенной формулой

$$d \approx 0{,}7\sqrt{I}. \qquad (12а)$$

Выбор магнитопровода производится с помощью выражения

$$Q_с Q_о = \frac{P_{габ} \cdot 10^2}{2{,}22 f B J \eta s k_с k_м}, \qquad (13)$$

где $Q_о$ — площадь окна магнитопровода, приходящаяся на обмотки одного стержня, см^2; η — коэффициент полезного действия трансформатора; s — число стержней, несущих обмотки; $k_м$ — коэффициент заполнения окна медью обмотки.

Остальные обозначения известны из предыдущего текста.

Площадь окна $Q_о$ магнитопроводов стержневого и броневого типов равна bh, а у кольцевых сердечников — $\pi d^2/4$ (см. рис. 3).

Коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора η, представляющий собой отношение отдаваемой мощности к потребляемой, обычно довольно высок и лежит в пределах 0,85—0,95; чем больше мощность трансформатора, тем выше его КПД.

Число стержней s трансформатора броневого типа равно единице, стержневого типа (с двумя катушками) — двум и трехфазного — трем. Для тороидальных трансформаторов $s=1$. Магнитопроводы стержневого типа ($s=2$) обычно применяют при мощностях более 250—300 В·А и частоте сети 50 Гц, а также в тех случаях, когда нужно улучшить охлаждение обмоток.

Коэффициент заполнения окна $k_м$ показывают, какую часть площади окна магнитопровода занимает чистая медь проводов обмотки (без изоляции). Так как кроме изоляции проводов (обычно эмалированных) катушка имеет межслоевую и межобмоточную изоляцию, а намотка производится на гильзу или на каркас, то все эти виды изоляции занимают значительную часть площади окна и коэффициент заполнения окна медью получается небольшим. Обычно $k_м = \frac{Q_{меди}}{Q_0} = 0{,}25 \div 0{,}35$; чем больше мощность трансформатора, тем больше $k_м$. Значения КПД и коэффициента заполнения окна, зависящие от некоторых параметров трансформатора, приводятся в табл. 8.

Если маломощный трансформатор работает от сети с частотой 50 Гц, то (13) можно упростить следующим образом:

для трансформаторов броневой конструкции

$$Q_c Q_o \approx 1{,}15 P_{габ}; \qquad (13а)$$

для трансформаторов стержневой конструкции

$$Q_c Q_o \approx 0{,}6 P_{габ}. \qquad (13б)$$

Значение габаритной мощности $P_{габ}$ в формулах (13), (13а), (13б) указывается в вольт-амперах.

Зная произведение $Q_c Q_o$, можно выбрать стандартный магнитопровод из табл. 1, 2 или 3, при этом выбранный магнитопровод должен иметь произведение $Q_c Q_o$ не меньше расчетного значения. Если имеется возможность изготовить пластины из трансформаторной стали, то размеры магнитопровода можно определить с помощью формул, в которых все линейные размеры указаны в сантиметрах (см. рис. 3):

$$\left.\begin{aligned} &a \approx 0{,}7\sqrt[4]{Q_c Q_o}; \quad b = a; \\ &c = 1{,}5a; \quad h = 2{,}5a. \end{aligned}\right\} \qquad (14)$$

Так как сечение стержня Q_c и площадь окна Q_o в конечном счете определяют габаритные размеры трансформатора, то выражение (13) показывает связь этих размеров с параметрами трансформатора. Ввиду того что рекомендуемые значения индукции B и плотности тока J лежат в сравнительно узких пределах, основное влияние на габаритные размеры оказывают габаритная мощность трансформатора $P_{габ}$ и частота питающей сети f. С увеличением $P_{габ}$ размеры трансформатора растут, а с увеличением f снижаются. Последнюю (частотную) зависимость часто используют для уменьшения массы и объема специальной аппаратуры. Так, источники вторичного электропитания самолетной аппаратуры, для которых уменьшение массы и габаритов играет весьма существенную роль, питаются от специальных самолетных генераторов, которые вырабатывают переменное напряжение с частотой 400 Гц. Такое повышение частоты (по сравнению с частотой 50 Гц) не только значительно уменьшает массу трансформаторов (в 4—5 раз), но так же резко снижает массу и объем сглаживающих фильтров выпрямителей.

После конструктивного расчета трансформатора по приближенным формулам полезно проверить коэффициент заполнения окна медью $k_м$.

Для трансформаторов броневой и стержневой конструкций

$$k_м = 8 \cdot 10^{-3} \frac{d_1^2 w_1 + d_2^2 w_2 + d_3^2 w_3 + \ldots}{Q_0}. \quad (15)$$

Для проводов с эмалевой изоляцией значение $k_м$ не должно превышать 0,3.

Для тороидальных трансформаторов на кольцевых магнитопроводах с внутренним диаметром d

$$k_м = \frac{d_1^2 w_1 + d_2^2 w_2 + d_3^2 w_3 + \ldots}{100 d^2}. \quad (15а)$$

В этом случае коэффициент $k_м$ не должен превышать 0,2.

Если рассчитанные по формулам (15) и (15а) коэффициенты заполнения превышают указанные значения (0,3 и 0,2), то это указывает на трудность (или невозможность) размещения обмоток в окне магнитопровода. В таком случае следует сделать перерасчет трансформатора для уменьшения числа витков или диаметра проводов обмоток; для этого можно немного увеличить индукцию B, или плотность тока J, или то и другое вместе.

Точный расчет нагрева трансформатора является достаточно сложной задачей, для решения которой требуется учет большого числа факторов. Поэтому удовлетворимся приближенным решением этого вопроса.

Трансформатор нагревается за счет потерь в стали и в меди, которые выделяются в виде теплоты, повышающей температуру трансформатора по отношению к температуре окружающей среды. Разность между температурой нагрева и температурой среды называется превышением температуры трансформатора и практически неизменна для данного трансформатора, работающего с постоянной нагрузкой. Допустимая температура нагрева определяется температурной стойкостью применяемых изоляционных материалов и чаще всего лежит в пределах от 105 до 130° С. Реже применяют материалы с допустимой температурой до 155—180° С. Чтобы ограничить температуру нагрева трансформатора,

нужно либо уменьшить потери в стали и меди, либо увеличить охлаждающую поверхность трансформатора. Следует отметить, что эти два мероприятия связаны между собой: уменьшение потерь приводит к увеличению габаритных размеров трансформатора, а следовательно, к увеличению его охлаждающей поверхности.

Под охлаждающей поверхностью трансформатора следует понимать открытые наружные поверхности магнитопровода и катушек. Поверхности могут быть покрыты компаундом, лаком или эмалью. Размеры охлаждающей поверхности (в квадратных сантиметрах) подсчитывают из чисто геометрических соображений. Если трансформатор установлен на металлическом шасси, то поверхность соприкосновения также учитывается при расчете охлаждающей поверхности. Для оценки превышения температуры трансформатора определяют удельные охлаждающие поверхности стали $s_с$ и меди $s_м$. Для этого площадь охлаждающей поверхности магнитопровода нужно разделить на значение потерь в нем, а площадь охлаждающей поверхности катушек — на значение потерь в обмотках. Если полученные значения $s_с$ и $s_м$ будут не менее 15—20 см²/Вт, то превышение температуры можно считать допустимым (40—60° С). Очевидно, что меньший нагрев будет при бóльших значениях $s_с$ и $s_м$. Если полученные значения $s_с$ и $s_м$ меньше рекомендуемых, необходимо перерассчитать трансформатор, задавшись более низкими значениями индукции B и плотности тока J.

Охлаждающая поверхность магнитопроводов рассчитывается по следующим формулам:

для броневой конструкции

$$S_с \approx 2\,[ac + (a + c)(2a + 2b + h)]; \qquad (16)$$

для стержневой конструкции (с двумя катушками)

$$S_с \approx 4\,[(a + b)(2a + c) + ac]. \qquad (16а)$$

Кольцевой магнитопровод обычно полностью закрывается обмотками, и его охлаждение происходит только через эти обмотки.

Охлаждающая поверхность обмоток вычисляется по формулам:

для броневой конструкции

$$S_м \approx 2\,[a\,(h + 2b) + 4b\,(h + b)]; \qquad (17)$$

для стержневой конструкции (с двумя катушками)

$$S_м \approx 2[(2a + c)(2b + h) + 2b(4b + 3h)]; \qquad (17а)$$

для кольцевого магнитопровода

$$S_м \approx 2{,}5D(D + d). \qquad (17б)$$

Потери в стали определяются по формуле

$$P_с = p_{уд} v_с \gamma k_с \cdot 10^{-3} = p_{уд} G, \text{ Вт}, \qquad (18)$$

где $p_{уд}$ — удельные потери в стали, Вт/кг; $v_с$ — объем магнитопровода, см^3; γ — плотность материала магнитопровода, г/см^3; G — масса магнитопровода, кг.

Объем магнитопровода находят по формулам:

для броневой конструкции

$$v_с \approx 2ac(a + b + h); \qquad (19)$$

для стержневой конструкции

$$v_с \approx 2ac(2a + 2b + h); \qquad (19а)$$

для кольцевого магнитопровода

$$v_с \approx 0{,}785c(D^2 - d^2). \qquad (19б)$$

Плотность электротехнической стали обычно находится в пределах $\gamma = 7{,}5 \div 7{,}7$ г/см^3.

Удельные потери в стали $p_{уд}$ зависят от частоты питающей сети f и выбранной индукции B. Ориентировочные значения $p_{уд}$ для электротехнической стали приведены в табл. 9. Значения удельных потерь в ленточных пермаллоевых материалах марок 50НП и 79НМ, применяемых для изготовления кольцевых витых неразрезных магнитопроводов, даны в табл. 10.

Потери в меди обмоток определяют по формуле

$$P_м = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 + I_3^2 r_3 + \ldots \qquad (20)$$

Сопротивление обмотки r рассчитывают по формуле

$$r = 2{,}2 \cdot 10^{-4} l_м \frac{w}{d^2}, \qquad (21)$$

где $l_м$ — средняя длина витка обмоток, см; w, d — число витков и диаметр провода (без изоляции) соответствующих обмоток.

Среднюю длину витка обмоток находят по формулам:

для броневой и стержневой конструкций

$$l_м \approx 2(a + c) + \pi b; \qquad (22)$$

Таблица 9

Ориентировочные значения удельных потерь в электротехнической стали

Частота сети, Гц	Индукция B, Тл	Удельные потери $p_{уд}$, Вт/кг	Толщина стали, мм
50	1,0 1,1 1,2 1,3 1,4 1,5 1,6	1,1 1,3 1,5 1,8 2,1 2,4 2,8	0,35—0,5
400	0,7 0,8 0,9 1,0 1,1 1,2	6,5 8,5 10,5 12,5 15,0 18,0	0,08—0,2

для кольцевых магнитопроводов

$$l_м \approx D + 0{,}6d + 2c. \tag{22а}$$

Удельные поверхности охлаждения для броневой и стержневой конструкций

$$s_с = \frac{S_с}{P_с}; \tag{23}$$

$$s_м = \frac{S_м}{P_м}. \tag{24}$$

Для кольцевого магнитопровода

$$s_м = \frac{S_м}{P_м + P_с}. \tag{24а}$$

Зная число витков первичной обмотки трансформатора и потери в стали и в меди, можно определить ток холостого хода и полный ток первичной обмотки с учетом тока холостого хода.

Ток холостого хода (ток первичной обмотки ненагруженного трансформатора) состоит из тока намагничивания I_μ, создающего магнитный поток, и тока $I_{п,с}$, вызванного потерями в стали $P_с$:

$$I_х = \sqrt{I_{п,с}^2 + I_\mu^2} \approx \sqrt{\left(\frac{P_с}{U_1}\right)^2 + 50\left(\frac{l_с}{w_1}\right)^2}. \tag{25}$$

Таблица 10

Удельные потери в ленточных материалах марок 50НП и 79НМ

Частота, кГц	Индукция B, Тл	Индукция насыщения B_s, плотность материала γ и толщина ленты				
		50 НП		79 НМ		
		B_s=1,5 Тл, γ=8,2 г/см³		B_s=0,75 Тл, γ=8,6 г/см³		
		0,05 мм	0,02 мм	0,1 мм	0,05 мм	0,02 мм
1,0	0,5	6	3,4	1,2	0,9	1
	0,65	8,4	4,4	2,1	1,4	1,4
	1,0	15	—	—	—	—
	1,2	19	—	—	—	—
	1,4	23	—	—	—	—
1,6	0,5	—	—	2,5	1,6	1,6
	0,65	—	—	4,5	2,7	2,6
2,4	0,5	17	9,6	5,2	2,9	2,7
	0,65	24	13,5	9,4	4,8	4,3
	1,0	43	—	—	—	—
	1,2	54	—	—	—	—
	1,4	65	—	—	—	—
3,5	0,5	27	—	11	5,2	4,4
	0,65	37	—	20	8,6	7
	1,0	70	—	—	—	—
	1,2	89	—	—	—	—
	1,4	107	—	—	—	—
5,0	0,5	42	21,5	20	10,5	6,6
	0,65	59	30	36	16	11
	1,0	120	—	—	—	—
	1,2	150	—	—	—	—
	1,4	180	—	—	—	—
7,5	0,5	67	41	41	20	12
	0,65	94	58	74	33	20
	1,0	205	—	—	—	—
	1,2	260	—	—	—	—
	1,4	310	—	—	—	—
10	0,5	100	56	90	32	18
	0,65	140	78	160	51	38
	1,0	287	—	—	—	—
	1,2	360	—	—	—	—
	1,4	440	—	—	—	—

Частота, кГц	Индукция B, Тл	Индукция насыщения B_s, плотность материала γ и толщина ленты				
		50 НП		79 НМ		
		B_s=1,5 Тл, γ=8,2 г/см³		B_s=0,75 Тл, γ=8,6 г/см³		
		0,05 мм	0,02 мм	0,1 мм	0,05 мм	0,02 мм
15	0,5	142	—	175	63	35
	0,65	195	—	320	100	60
	1,0	470	—	—	—	—
	1,2	600	—	—	—	—
	1,4	720	—	—	—	—
20	0,5	190	—	305	100	53
	0,65	260	—	500	150	80
	1,0	720	—	—	—	—
	1,2	930	—	—	—	—

Примечание. Технические характеристики сплавов 50НП и 79НМ даны в ГОСТ 10160-75 и ГОСТ 10994-74.

Полный ток первичной обмотки $I'_{1общ}$ нагруженного трансформатора учитывает кроме тока холостого хода также ток $I_{п,м}$, вызванный потерями в меди $P_м$:

$$I_{1общ} = \sqrt{(I_{1общ} + I_{п,с} + I_{п,м})^2 + I_\mu^2} \approx$$

$$\approx \sqrt{\left(I_{1общ} + \frac{P_c + P_м}{U_1}\right)^2 + 50\left(\frac{l_c}{w_1}\right)^2}. \qquad (26)$$

В формулах (25) и (26): l_c — средняя длина магнитной силовой линии (в сантиметрах), значения которой приведены в табл. 1—3; $I_{1общ}$ — ток первичной обмотки многообмоточного трансформатора, определяемый (7).

Током холостого хода в трансформаторах с кольцевыми пермаллоевыми магнитопроводами можно пренебречь, и поэтому для таких трансформаторов $I'_{1общ} \approx \approx I_{1общ}$.

В тех случаях, когда необходимо повысить или понизить имеющееся напряжение на 30—40%, часто применяют **автотрансформатор**, который представляет собой трансформатор с одной обмоткой, имеющей отводы. При использовании автотрансформатора надо иметь в виду, что напряжение питающей сети (например,

127 или 220 В) будет иметь гальваническую (непосредственную) связь с нагрузкой. Если такая связь недопустима, то автотрансформатор применять нельзя. Автотрансформаторы имеют меньшие габариты по сравнению с трансформаторами при одинаковой мощности в нагрузке. Это преимущество особенно отчетливо проявляется в автотрансформаторах, предназначенных для получения небольших повышений или понижений напряжения.

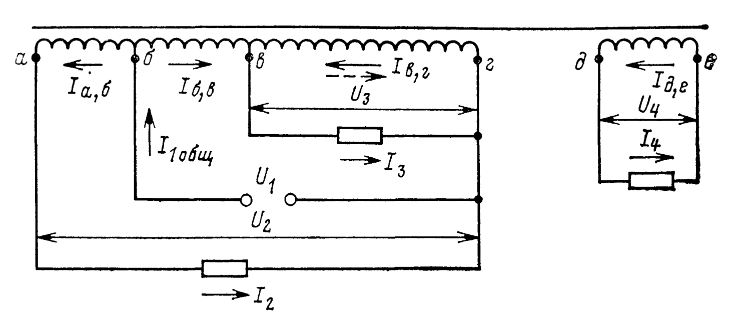


Рис. 16. Схема универсального автотрансформатора

На рис. 16 показана схема универсального автотрансформатора, у которого напряжение U_1 может повышаться до значения U_2 (вывода *а*, *г*) и понижаться до значения U_3 (выводы *в*, *г*). Кроме того, имеется дополнительная изолированная обмотка с напряжением U_4 (выводы *д*, *е*). Габаритная мощность такого автотрансформатора рассчитывается по формуле

$$P_{габ} = \frac{1}{2}\left[(U_2 - U_1)I_2 + (U_1 - U_3)I_{б,в} + U_3 I_{в,г} + U_4 I_4\right], \tag{27}$$

где $I_{б,в} = I_{1общ} - I_2$; $I_{в,г} = |I_3 - I_{б,в}|$ — абсолютное значение разности (без учета знака); $I_{1общ}$ вычисляется по формуле (7).

Если автотрансформатор имеет только повышающую обмотку, т. е. $U_3 = U_4 = 0$ и $I_3 = I_4 = 0$, то

$$P_{габ} = U_2 I_2 \left(\frac{n_2 - 1}{n_2}\right). \tag{27а}$$

Если имеется только понижающая обмотка, т. е. $U_2 = U_4 = 0$ и $I_2 = I_4 = 0$, то

$$P_{габ} = U_3 I_3 (1 - n_3). \tag{27б}$$

Ток $I_{в,г}$ на участке *вг* обмотки может или совпадать по направлению с током $I_{б,в}$ на участке *бв* или иметь противоположное направление. Совпадение направлений токов будет в том случае, когда ток I_3 меньше тока $I_{б,в}$ (пунктирная стрелка на рис. 16); противоположные направления токов будут, когда ток I_3 больше тока $I_{б,в}$ (сплошная стрелка на рис. 16). Так как направление тока не влияет на габаритную мощность трансформатора, то в (27) следует подставлять значение тока $I_{в,г}$ без учета знака (абсолютное значение).

При расчете диаметров проводов автотрансформатора в формулу (12) или (12а) следует подставлять значения токов $I_{а,б}$, $I_{б,в}$, $I_{в,г}$ и $I_{д,е}$ соответствующих участков обмотки. Очевидно, что $I_{а,б}=I_2$; $I_{д,е}=I_4$, а формулы для расчета $I_{б,в}$ и $I_{в,г}$ даны выше.

В остальном расчет автотрансформатора не отличается от расчета обычного трансформатора.

Последовательное и параллельное включение обмоток трансформатора применяется очень часто. Последовательное включение нескольких обмоток используется для получения более высокого напряжения, чем это может обеспечить одна обмотка, а параллельное включение — для увеличения тока нагрузки по сравнению с допустимым током нагрузки одной обмотки.

При последовательном включении обмоток общее напряжение равно сумме напряжений отдельных обмоток, а ток нагрузки не должен превышать тока обмотки с наименьшим допустимым током.

Параллельно можно включать только те обмотки, которые имеют одинаковые напряжения, при этом общий допустимый ток нагрузки будет равен сумме токов каждой обмотки, а напряжение — напряжению одной обмотки.

При последовательном и параллельном соединении обмоток необходимо соблюдать некоторые правила, обеспечивающие одинаковые направления магнитных потоков, создаваемых этими обмотками.

Если трансформатор имеет броневую конструкцию и все обмотки намотаны в одну сторону (что чаще всего встречается на практике), то при последовательном включении нужно соединять конец одной обмотки с началом другой (рис. 17, *а*). При параллельном включении нужно соединять между собой одноименные выводы, т. е. начало с началом и конец с концом (рис. 17, *б*).

В трансформаторах, имеющих нумерацию выводов, начало обмотки имеет обычно меньший порядковый номер, а конец — больший.

. Если трансформатор имеет стержневую конструкцию (с двумя катушками, намотанными в одну сторону), то при последовательном включении обмоток, расположенных на разных стержнях, необходимо соединять

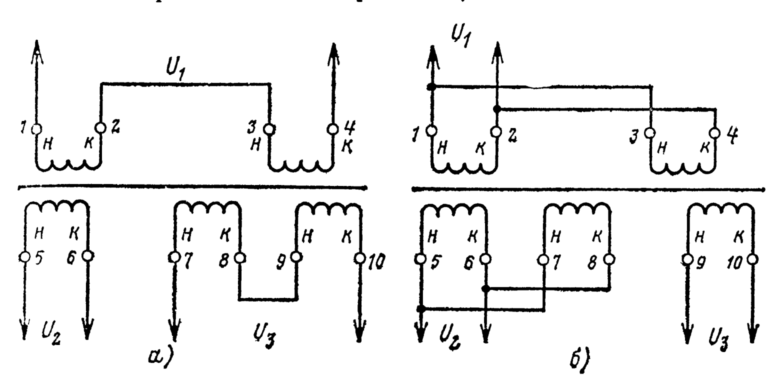


Рис. 17. Пример последовательного (*а*) и параллельного (*б*) соединений обмоток трансформаторов броневой конструкции.

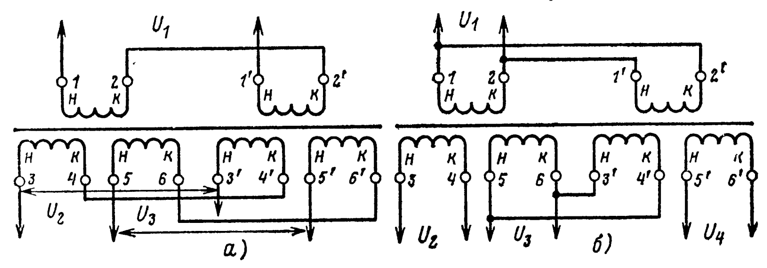


Рис. 18. Пример последовательного (*а*) и параллельного (*б*) соединений обмоток трансформаторов стержневой конструкции.

(Обмотки с выводами *1—6* расположены на одном стержне, а с выводами *1'—6'* — на другом.)

между собой одноименные выводы обмоток, т. е. начало с началом или конец с концом (рис. 18, *а*). При параллельном включении обмоток, расположенных на разных стержнях, следует соединять между собой разноименные выводы обмоток, т. е. начало с концом и конец с началом (рис. 18, *б*). Если же обмотки расположены на одном из двух стержней, то действует правило соединений для броневой конструкции.

В некоторых случаях требуется понизить напряжение той или иной обмотки. Для этого можно использовать последовательное встречное включение обмоток, при котором их напряжения вычитаются. Очевидно, что при встречном включении выводы обмоток должны соединяться между собой способом, противоположным указанному выше (например, конец с концом, а не конец с началом другой обмотки).

Указанные способы соединения обмоток обеспечивают нужное направление магнитных потоков в стержнях магнитопроводов. В трансформаторах броневой конструкции магнитные потоки, создаваемые обмотками, совпадают по направлению в стержне, а в трансформаторах стержневой конструкции магнитные потоки в стержнях имеют противоположные направления, т. е. магнитный поток одного стержня является продолжением магнитного потока другого.

Подобным же образом можно соединять между собой последовательно и параллельно обмотки, размещенные на разных трансформаторах. При последовательном включении вторичных обмоток необходимо соединять разноименные выводы обмоток, а при параллельном — одноименные, при этом первичные обмотки трансформаторов надо соединять параллельно (одноименными выводами или одинаковыми номерами выводов).

Параллельное и последовательное включение обмоток часто применяется при питании трансформатора от сетей с разными напряжениями; например, при питании от сети 127 В применяется параллельное включение половин первичной обмотки, а при напряжении 220 В — последовательное включение (см. приложение 2).

В момент включения трансформатора в питающую сеть по первичной обмотке трансформатора протекает кратковременный импульс тока, превышающий расчетное значение тока обмотки. Возникновение импульса связано с тем, что магнитный поток, возникающий под действием приложенного напряжения, достигает расчетного значения, соответствующего выбранной индукции *B*, не сразу, а постепенно (в течение нескольких периодов переменного напряжения). Поэтому ЭДС первичной обмотки, противодействующая приложенному напряжению, возникает также не сразу, а постепенно. Так как приложенное напряжение сети в течение некоторого времени остается неуравновешенным, то это вызывает

(на такое же время) увеличение тока, отбираемого трансформатором из питающей сети.

Кратковременное увеличение тока при включении трансформатора может привести к перегоранию предохранителя в цепи первичной обмотки, если он выбран без достаточного запаса по току. Рекомендуется выбирать предохранитель на ток в 1,5—2 раза больше расчетного значения тока первичной обмотки.

Расчет трансформаторов для транзисторных преобразователей постоянного напряжения имеет ряд особенностей, связанных с работой преобразователей.

Так как транзисторные преобразователи работают при повышенных частотах (1—50 кГц), то для снижения потерь в магнитопроводе трансформатора при частотах до 25 кГц обычно используются кольцевые неразрезные магнитопроводы из тонких магнитных материалов (пермаллоев), при более высоких частотах применяют ферриты. Если обычные трансформаторы питания работают при синусоидальной форме напряжения сети, то форма переменного напряжения, вырабатываемого преобразователем, не синусоидальная, а прямоугольная. Трансформаторы преобразователя работают при прямоугольной форме напряжения в двух разных режимах в зависимости от своего назначения.

Когда трансформатор работает в преобразователе в схеме усилителя мощности (например, в качестве выходного трансформатора), то режим его работы мало отличается от режима обычного трансформатора питания. Если в этом случае частота преобразователя не превышает 3 кГц, то в трансформаторе можно использовать магнитопровод из обычной электротехнической стали; он может быть выполнен из пластин толщиной 0,1—0,2 мм или в виде витого разрезного магнитопровода из ленты толщиной 0,08—0,1 мм. При этом значения индукции B надо выбирать в 1,5—2 раза ниже рекомендуемых (см. табл. 8) для частоты 400 Гц.

Если же трансформатор используется в схеме задающего автогенератора (инвертора), то он работает в так называемом режиме магнитного насыщения, при котором магнитная индукция B всегда достигает своей предельной величины — индукции насыщения B_s — неизменной для выбранного магнитного материала. Такие трансформаторы выполняются только на кольцевых пермаллоевых магнитопроводах или на ферритах. При расчете

трансформаторов, работающих в режиме магнитного насыщения, в формулы (10) и (13) надо подставлять значение индукции насыщения B_s для выбранного магнитного материала; значения B_s приведены в табл. 10.

Учитывая несинусоидальную форму кривой напряжения на обмотках трансформаторов преобразователей, в расчетные формулы должны быть внесены следующие изменения: в формуле (10) коэффициент 4,44 в знаменателе заменить на 4; в формуле (13) коэффициент 2,22 в знаменателе заменить на 2.

Указанные изменения относятся к расчету трасформаторов преобразователей, работающих в режиме магнитного насыщения и в схемах усилителей.

Так как преобразователи работают на частотах, отличных от 50 Гц, то упрощенными формулами (10а), (12а), (13а), (13б) пользоваться нельзя.

Для того чтобы ознакомить читателя с работой преобразователей постоянного напряжения, получивших в настоящее время широкое распространение, в приложении 1 дано упрощенное описание принципа действия транзисторного преобразователя напряжения с трансформатором, работающим в режиме насыщения (при индукции $B = B_s$).

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Рассмотрим несколько примеров расчета маломощных трансформаторов питания. Справочные данные, необходимые для расчетов, приведены в соответствующих таблицах.

При расчете трансформаторов, нагруженных на схемы выпрямителей, необходимо иметь в виду, что параметры трансформаторов (напряжения и токи обмоток) будут отличаться друг от друга в зависимости от типа сглаживающего фильтра выпрямителя. При равенстве выпрямленных напряжений и токов и при одинаковых схемах выпрямления трансформатор, работающий на выпрямитель с фильтром, начинающимся с емкости, будет иметь меньшие напряжения, но бо́льшие токи обмоток, чем при работе на выпрямитель с фильтром, начинающимся с индуктивности. Эти особенности учтены в формулах табл. 11.

Ток первичной обмотки, вычисляемый по формулам табл. 11, обозначен как $I_{1,2}$, что соответствует схемам

трансформаторов, имеющих по две обмотки. Если трансформатор имеет третью, четвертую и другие обмотки, необходимо для определения общего тока первичной обмотки вычислить значения токов, вызываемых всеми обмотками, т. е. $I_{1,2}$, $I_{1,3}$, $I_{1,4}$ и т. д., и просуммировать эти токи.

Пример 1. Рассчитать трансформатор, питаемый от сети $U_1=127$ В, 50 Гц и нагруженный: на цепь накала с напряжением $U_2=6,3$ В при токе $I_2=1$ А; на двухполупериодный выпрямитель, работающий на индуктивность, с выходным напряжением $U_0=6$ В при токе нагрузки $I_0=2,5$ А; на мостовую схему выпрямителя, работающего на емкость, с выходным напряжением $U_0=60$ В при токе нагрузки $I_0=0,1$ А.

Схема трансформатора показана на рис. 19, *а*.

1. Определяем напряжения и ЭДС обмоток.

По формуле (11) $E_1 \approx 0,95 \cdot 127 = 121$ В;

$$E_2 \approx 1,05 \cdot 6,3 = 6,6 \text{ В}.$$

Из табл. 11, вторая строка, седьмой столбец $U_3 = 1,1 \times 6 + 1 = 7,6$ В;

по формуле (11) $E_3 \approx 1,05 \cdot 7,6 = 8$ В.

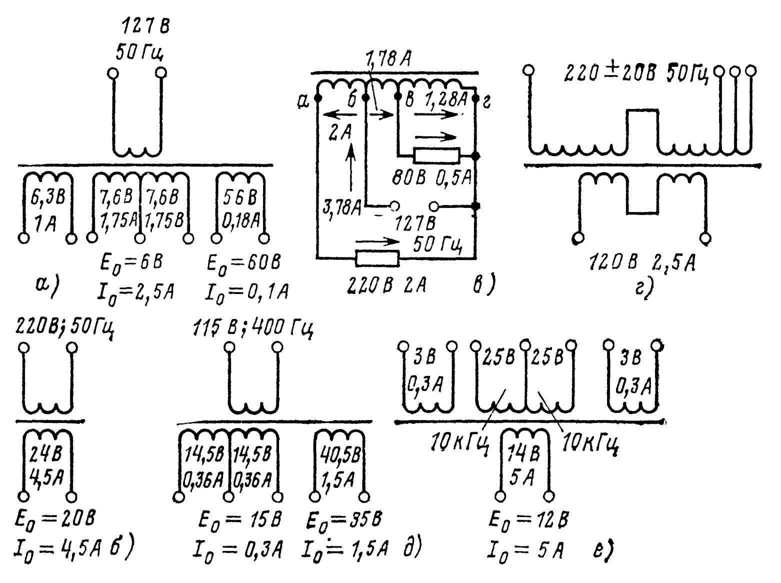


Рис. 19. Схемы трансформаторов к примерам расчетов.

Таблица 11

Напряжения и токи обмоток трансформаторов, работающих в схемах

Наименование схемы выпрямителя	Схема выпрямителя, работающего на фильтр, начинающийся с емкости	Напряжение вторичной обмотки U_2	Ток вторичной обмотки I_2
Однополупериодная	I_0 + − U_1 I_1 I_2 U_2 C_0 U_0	$\frac{U_0+1}{1,1}$	$2,5\ I_0$
Двухполупериодная со средним выводом вторичной обмотки	I_0 + − I_1 U_1 I_2 U_2 C_0 U_0	$\frac{U_0+1}{1,1}$	$1,2\ I_0$
Однофазная мостовая	I_0 + − I_1 U_1 I_2 U_2 C_0 U_0	$\frac{U_0+2}{1,1}$	$1,8\ I_0$
Симметричная схема удвоения напряжения	I_0 + − U_1 I_1 I_2 U_2 U_2 C_{01} C_{02} U_0	$\frac{\frac{U_0}{2}+1}{1,1}$	$3,5\ I_0$

выпрямителей

Ток первичной обмотки $I_{1,2}$	Схема выпрямителя, работающего на фильтр, начинающийся с индуктивности	Напряжение вторичной обмотки U_2	Ток вторичной обмотки I_2	Ток первичной обмотки $I_{1,2}$
$2{,}3\ I_0 \frac{U_2}{U_1}$	Не применяется	—	—	—
$1{,}7\ I_0 \frac{U_2}{U_1}$		$1{,}1\ U_0 + 1$	$0{,}7\ I_0$	$I_0 \frac{U_2}{U_1}$
$1{,}8\ I_0 \frac{U_2}{U_1}$		$1{,}1\ U_0 + 2$	I_0	$I_0 \frac{U_2}{U_1}$
$3{,}5\ I_0 \frac{U_2}{U_1}$	Не применяется	—	—	—

Из табл. (11), третья строка, третий столбец $U_4 \approx$

$$\approx \frac{60+2}{1,1} = 56 \text{ В};$$

по формуле (11) $E_4 \approx 1,05 \cdot 56 = 59$ В.

2. Находим токи обмоток (действующие значения).

По формуле (7) $I_{1,2} = 1 \frac{6,6}{121} = 0,055$ А.

Из табл. 11, вторая строка, восьмой столбец $I_3 \approx$

$\approx 0,7 \cdot 2,5 = 1,75$ А;

$$I_{1,3} \approx 2,5 \frac{8}{121} = 0,165 \text{ А}.$$

Из табл. 11, третья строка, четвертый столбец $I_4 \approx$

$\approx 1,8 \cdot 0,1 = 0,18$ А;

$$I_{1,4} \approx 1,8 \cdot 0,1 \frac{59}{121} = 0,088 \text{ А}.$$

По формуле (7) $I_{1общ} \approx 0,055 + 0,165 + 0,088 = 0,31$ А.

3. Определяем габаритную мощность трансформатора по формуле (9):

$$P_{габ} = \frac{1}{2}(127 \cdot 0,31 + 6,3 \cdot 1 + 7,6 \cdot 1,75 \cdot 2 +$$

$$+ 56 \cdot 0,18) = 41 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

При расчете мощности третьей обмотки введен коэффициент 2, так как эта обмотка состоит из двух половин с напряжением 7,6 В и током 1,75 А каждая.

4. По приближенной формуле (13а) находим (для магнитопровода броневого типа) $Q_cQ_o \approx 1,15 \cdot 41 = 47$ см^4.

Из табл. 1 выбираем магнитопровод Ш20×25, имеющий $Q_cQ_o = 50$ см^4 (ближайшее большее). У этого магнитопровода $Q_c = 5$ см^2, $Q_o = 10$ см^2.

5. Находим числа витков обмоток по упрощенной формуле (10а):

$$w_1 = 45 \frac{121}{5} = 1090 \text{ витков};$$

$$w_2 \approx 45 \frac{6,6}{5} = 59 \text{ витков};$$

$$w_3 \approx 45\frac{8}{5} = 72 \cdot 2 \text{ витков;}$$

$$w_4 \approx 45\frac{59}{5} = 530 \text{ витков;}$$

6. Находим диаметры проводов (без изоляции) по приближенной формуле (12а):

$$d_1 \approx 0{,}7\sqrt{0{,}31} = 0{,}39 \approx 0{,}38 \text{ мм;}$$

$$d_2 \approx 0{,}7\sqrt{1} = 0{,}7 \approx 0{,}69 \text{ мм;}$$

$$d_3 \approx 0{,}7\sqrt{1{,}75} = 0{,}92 \approx 0{,}93 \text{ мм;}$$

$$d_4 \approx 0{,}7\sqrt{0{,}18} = 0{,}296 \approx 0{,}29 \text{ мм.}$$

Диаметры проводов округлены до стандартных.

7. Проверяем коэффициент заполнения окна медью обмотки по формуле (15):

$$k_м = 8 \cdot 10^{-3} \times$$

$$\times \frac{0{,}38^2 \cdot 1090 + 0{,}69^2 \cdot 59 + 0{,}93^2 \cdot 72 \cdot 2 + 0{,}29^2 \cdot 530}{10} = 0{,}282.$$

Так как $k_м$ не превышает значения 0,3, то обмотки с межслоевой и межобмоточной изоляцией должны разместиться в окне сердечника.

Пример 2. Рассчитать трансформатор, питаемый от сети U_1=220 В, 50 Гц и нагруженный на мостовую схему выпрямителя, работающего на индуктивность, с выходным напряжением U_0=20 В при токе нагрузки I_0=4,5 А.

Схема трансформатора показана на рис. 19, *б*.

1. Определяем напряжения и ЭДС обмоток.

По формуле (11) $E_1 \approx 0{,}95 \cdot 220 = 209$ В.

Из табл. 11, третья строка, седьмой столбец $U_2 \approx$ $\approx 1{,}1 \cdot 20 + 2 = 24$ В.

По формуле (11) $E_2 \approx 1{,}05 \cdot 24 = 25$ В.

2. Находим токи обмоток.

Из табл. 11, третья строка, восьмой столбец I_2= =4,5 А;

$$I_{1,2} = 4{,}5\frac{25}{209} = 0{,}54 \text{ А.}$$

В данном случае $I_1 \approx I_{1,2} = 0{,}54$ А.

3. Габаритную мощность трансформатора определяем по формуле (9):

$$P_{габ} = \frac{1}{2}(220 \cdot 0,54 + 24 \cdot 4,5) = 114 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

4. По формуле (13) определим произведение $Q_c Q_o$; для этого предварительно найдем значения B, J, η, $k_м$ из табл. 8: $B=1,3$ Тл; $J=2,4$ А/мм²; $\eta=0,91$; $k_м=0,31$.

Выбираем магнитопровод броневого типа ($s=1$), а значение k_c примем равным 0,93, тогда

$$Q_c Q_o = \frac{114 \cdot 10^2}{2,22 \cdot 50 \cdot 1,3 \cdot 2,4 \cdot 0,91 \cdot 1 \cdot 0,93 \cdot 0,31} = 125 \text{ см}^4.$$

Из табл. 1 выбираем магнитопровод Ш25×32, имеющий $Q_c Q_o=125$ см⁴; $Q_c=8$ см²; $Q_o=15,6$ см²; $a=b=2,5$ см; $h=6,25$ см; $c=3,2$ см; $l_c=21,4$ см; $l_м=19,3$ см; $G=1,17$ кг.

5. Находим числа витков обмоток по формулам (10) и (5):

$$w_1 = \frac{209 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,3 \cdot 8 \cdot 0,93} \approx 1000 \text{ витков};$$

$$w_2 = 1000 \frac{25}{209} = 120 \text{ витков}.$$

6. Находим диаметр проводов (без изоляции) по формуле (12):

$$d_1 = 1,13 \sqrt{\frac{0,54}{2,4}} = 0,535 \approx 0,53 \text{ мм};$$

$$d_2 = 1,13 \sqrt{\frac{4,5}{2,4}} = 1,55 \approx 1,5 \text{ мм}.$$

7. Определяем потери в стали, используя табл. 9 и формулу (18):

$$P_c = 1,8 \cdot 1,17 = 2,1 \text{ Вт}.$$

8. Находим потери в меди по формуле (20). Для этого определяем сопротивления обмоток по формуле (21):

$$r_1 = 2,2 \cdot 10^{-4} \cdot 19,3 \frac{1000}{0,53^2} = 15 \text{ Ом};$$

$$r_2 = 2,2 \cdot 10^{-4} \cdot 19,3 \frac{120}{1,5^2} = 0,23 \text{ Ом}.$$

Тогда $P_м=0,54^2 \cdot 15+4,5^2 \cdot 0,23=4,4+4,7=9,1$ Вт.

9. Охлаждающую поверхность броневого магнитопровода находим по формуле (16):

$$S_c \approx 2\,[2{,}5\cdot 3{,}2 + (2{,}5 + 3{,}2)(2\cdot 2{,}5 + + 2\cdot 2{,}5 + 6{,}25)] = 201 \text{ см}^2.$$

10. Удельную поверхность охлаждения магнитопровода находим по формуле (23):

$$s_c = \frac{201}{2{,}1} = 96 \text{ см}^2/\text{Вт} \gg 20 \text{ см}^2/\text{Вт},$$

т. е. нагрев магнитопровода будет незначительным.

11. Охлаждающую поверхность катушки находим по формуле (17):

$$S_м \approx 2\,[2{,}5\,(6{,}25 + 2\cdot 2{,}5) + 4\cdot 2{,}5\,(6{,}25 + 2{,}5)] = 231 \text{ см}^2.$$

12. Удельную поверхность охлаждения катушки находим по формуле (24):

$$s_м = \frac{231}{9{,}1} = 25{,}4 \text{ см}^2/\text{Вт} > 20 \text{ см}^2/\text{Вт},$$

т. е. нагрев катушки будет ниже допустимого значения.

13. Находим полный ток первичной обмотки с учетом тока намагничивания I_μ и потерь в стали и в меди по формуле (26):

$$I_1' \approx \sqrt{\left(0{,}54 + \frac{2{,}1 + 9{,}1}{220}\right)^2 + 50\left(\frac{21{,}4}{1000}\right)^2} \approx 0{,}6 \text{ А}.$$

14. Находим ток холостого хода трансформатора по формуле (25):

$$I_x \approx \sqrt{\left(\frac{2{,}1}{220}\right)^2 + 50\left(\frac{21{,}4}{1000}\right)^2} \approx 0{,}14 \text{ А}.$$

Пример 3. Рассчитать автотрансформатор, питаемый от сети $U_1=127$ В, 50 Гц и работающий на нагрузки $U_2=220$ В при токе $I_2=2$ А и $U_3=80$ В при токе $I_3= =0{,}5$ А.

Схема автотрансформатора показана на рис. 19, *в*.

1. Определяем ЭДС обмоток по формуле (11):

$$E_1 \approx 0{,}95\cdot 127 = 121 \text{ В};$$

$$E_2 \approx 1{,}05\cdot 220 = 231 \text{ В};$$

$$E_3 \approx 1{,}05\cdot 80 = 84 \text{ В}.$$

2. Находим ток, потребляемый из сети, и токи в обмотках по формуле (28):

$$I_{1общ} = 2\frac{220}{127} + 0,5\frac{80}{127} = 3,78 \text{ A};$$

$$I_{а,б} = I_2 = 2\text{A};$$

$$I_{б,в} = 3,78 - 2 = 1,78 \text{ A};$$

$$I_{в,г} = |0,5 - 1,78| = 1,28 \text{ A}$$

3. Находим габаритную мощность автотрансформатора по формуле (27):

$$P_{габ} = \frac{1}{2}[(220 - 127)2 + (127 - 80)1,78 +$$

$$+ 80 \cdot 1,28] = 187 \text{ В}\cdot\text{А}.$$

Здесь следует обратить внимание на то, что габаритная мощность автотрансформатора в данном случае в 2,6 раза меньше, чем мощность, выделяемая в нагрузках и равная 440+40=480 Вт.

4. По приближенной формуле (13а) находим для магнитопровода броневого типа произведение $Q_cQ_o \approx \approx 1,15 \cdot 187 = 215$ см^4.

Из табл. 1 выбираем магнитопровод типа Ш32×32, у которого $Q_cQ_o = 261$ см^4.

Выбранный магнитопровод имеет $Q_c = 10,2$ см^2 и $Q_o = = 25,6$ см^2.

5. Находим числа витков обмоток по приближенной формуле (10а):

$$w_{а,б} \approx 45\frac{E_2 - E_1}{Q_c} = 45\frac{231 - 121}{10,2} = 485 \text{ витков};$$

$$w_{б,в} \approx 45\frac{E_1 - E_3}{Q_c} = 45\frac{121 - 84}{10,2} = 163 \text{ витка};$$

$$w_{в,г} \approx 45\frac{E_3}{Q_c} = 45\frac{84}{10,2} = 372 \text{ витка}.$$

6. Находим диаметры проводов (без изоляции) по приближенной формуле (12а):

$$d_{а,б} \approx 0,7\sqrt{I_{а,б}} = 0,7\sqrt{2} = 0,99 \approx 1,0 \text{ мм};$$

$$d_{б,в} \approx 0,7\sqrt{I_{б,в}} = 0,7\sqrt{1,78} = 0,93 \text{ мм};$$

$$d_{в,г} \approx 0,7\sqrt{I_{в,г}} = 0,7\sqrt{1,28} = 0,79 \approx 0,8 \text{ мм}.$$

7. Проверяем коэффициент заполнения окна по формуле (15):

$$k_м = 8 \cdot 10^{-3} \frac{1^2 \cdot 4,85 + 0,93^2 \cdot 163 + 0,8^2 \cdot 372}{25,6} = 0,27.$$

Значение $k_м = 0,27 < 0,3$ указывает на то, что обмотки трансформатора разместятся в окне выбранного магнитопровода.

Пример 4. Рассчитать трансформатор, питаемый от сети $U_1 = 220$ В, 50 Гц и работающий на нагрузку $U_2 = 120$ В при токе $I_2 = 2,5$ А. На первичной обмотке сделать отводы, позволяющие работать при понижении напряжения до 200 В и при повышении напряжения до 240 В.

Схема трансформатора показана на рис. 19, *г*.

1. Определяем ЭДС обмоток по формуле (11):

$$\left.\begin{aligned} E_1' &\approx 0,95 \cdot 200 = 190 \text{ В};\\ E_1'' &\approx 0,95 \cdot 220 = 209 \text{ В};\\ E_1''' &\approx 0,95 \cdot 240 = 228 \text{ В}; \end{aligned}\right\} \text{отводы 1-й обмотки}$$

$$E_2 \approx 1,05 \cdot 120 = 126 \text{ В}.$$

2. Находим ток первичной обмотки по формуле (7):

$$I_1 = 2,5 \frac{126}{209} = 1,5 \text{ А}.$$

3. В соответствии с формулой (9а)

$$P_{габ} = 120 \cdot 2,5 = 300 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

4. Находим произведение Q_cQ_o по формуле (13). Предварительно из табл. 8 находим: $B = 1,2$ Тл; $J = 1,8$ А/мм^2; $\eta = 0,94$; $k_м = 0,32$.

Для $P_{габ} = 300$ В·А выбираем магнитопровод стержневого типа ($s = 2$) и $k_c = 0,94$, тогда

$$Q_c Q_o = \frac{300 \cdot 10^2}{2,22 \cdot 50 \cdot 1,2 \cdot 1,8 \cdot 0,94 \cdot 2 \cdot 0,94 \cdot 0,32} = 221 \text{ см}^4.$$

Из табл. 2 выбираем стержневой магнитопровод типа П34×50×90, имеющий $Q_cQ_o = 230$ см^4; $Q_c = 17$ см^2; $Q_o = bh = 13,5$ см^2.

5. Находим числа витков обмоток по формулам (10) и (5):

$$w_1' = \frac{190 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,2 \cdot 17 \cdot 0,94} = 450 \text{ витков};$$

$$w_1'' = 450\frac{209}{190} = 495 \text{ витков};$$

$$w_1''' = 450\frac{228}{190} = 540 \text{ витков } (270\cdot 2).$$

На одной из катушек первой обмотки сделаем отводы от 450—270=180 витков и от 495—270=225 витков:

$$w_2 = 450\frac{126}{190} = 300 \text{ витков } (150\cdot 2).$$

6. Находим диаметры проводов обмоток (без изоляции) по формуле (12):

$$d_1 = 1{,}13\sqrt{\frac{1{,}5}{1{,}8}} = 1{,}03 \approx 1{,}04 \text{ мм};$$

$$d_2 = 1{,}13\sqrt{\frac{2{,}5}{1{,}8}} = 1{,}33 \approx 1{,}35 \text{ мм}.$$

Пример 5. Рассчитать трансформатор, питаемый от сети U_1=115 В 400 Гц и нагруженный: на двухполупериодный выпрямитель, работающий на емкость, с выходным напряжением U_0=15 В при токе нагрузки I_0=0,3 А; на мостовую схему выпрямителя, работающего на индуктивность, с выходным напряжением U_0=35 В при токе нагрузки I_0=1,5 А.

Схема трансформатора показана на рис. 19, *д*.

1. Определяем напряжения и ЭДС обмоток.

По формуле (11) $E_1 \approx 0{,}95\cdot 115 = 109$ В.

Из табл. 11, вторая строка, третий столбец

$$U_2 \approx \frac{15+1}{1{,}1} = 14{,}5 \text{ В},$$

По формуле (11) $E_2 \approx 1{,}05\cdot 14{,}5 = 15{,}2$ В.

Из табл. 11, третья строка, седьмой столбец $U_3 \approx \approx 1{,}1\cdot 35 + 2 = 40{,}5$ В.

По формуле (11) $E_3 \approx 1{,}05\cdot 40{,}5 = 42{,}5$В.

2. Находим токи обмоток.

Из табл. 11, вторая строка, четвертый столбец $I_2 \approx \approx 1{,}2\cdot 0{,}3 = 0{,}36$ А;

$$I_{1,2} \approx 1{,}7\cdot 0{,}3\frac{15{,}2}{109} = 0{,}071 \text{ А}.$$

Из табл. 11, третья строка, восьмой столбец I_3=1,5 А;

$$I_{1,3} = 1{,}5\frac{42{,}5}{109} = 0{,}585 \text{ А}.$$

По формуле (7) $I_{1общ} \approx 0{,}071+0{,}585=0{,}656$ А.

3. Определяем габаритную мощность по формуле (9):

$$P_{габ} = \frac{1}{2}(115 \cdot 0{,}656 + 14{,}5 \cdot 0{,}36 \cdot 2 + 40{,}5 \cdot 1{,}5) = 75 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

4. По формуле (13) находим произведение $Q_c Q_o$ для магнитопровода броневого типа; предварительно из табл. 8 находим: $B=1{,}25$ Тл; $J=4$ А/мм^2; $\eta=0{,}87$; $k_м=0{,}3$. Полагаем $k_c=0{,}92$, тогда

$$Q_c Q_o = \frac{75 \cdot 10^2}{2{,}22 \cdot 400 \cdot 1{,}25 \cdot 4 \cdot 0{,}87 \cdot 1 \cdot 0{,}92 \cdot 0{,}3} = 7 \text{ см}^4.$$

Из табл. 1 выбираем магнитопровод Ш12×16, у которого $Q_c Q_o=6{,}9$ см^4; $Q_c=1{,}92$ см^2; $Q_o=3{,}6$ см^2.

5. Находим числа витков по формулам (10) и (5):

$$w_1 = \frac{109 \cdot 10^4}{4{,}44 \cdot 400 \cdot 1{,}25 \cdot 1{,}92 \cdot 0{,}92} = 278 \text{ витков};$$

$$w_2 = 278 \frac{15{,}2}{109} = 39 \text{ витков} \cdot 2;$$

$$w_3 = 278 \frac{42{,}5}{109} = 108 \text{ витков}.$$

6. Определяем диаметры проводов без изоляции по формуле (12):

$$d_1 = 1{,}13 \sqrt{\frac{0{,}656}{4}} = 0{,}457 \approx 0{,}47 \text{ мм};$$

$$d_2 = 1{,}13 \sqrt{\frac{0{,}36}{4}} = 0{,}34 \approx 0{,}33 \text{ мм};$$

$$d_3 = 1{,}13 \sqrt{\frac{1{,}5}{4}} = 0{,}692 \approx 0{,}69 \text{ мм}.$$

Пример 6. Рассчитать трансформатор для транзисторного двухтактного преобразователя напряжения, работающего на частоте 10 кГц. Трансформатор работает в режиме усиления мощности и нагружен на мостовую схему выпрямителя, работающего на индуктивность, с выходным напряжением $U_0=12$ В при токе нагрузки $I_0=5$ А.

Из расчета преобразователя известны следующие данные: напряжение коллекторной обмотки (первичной) $U_1=25$ В×2; напряжение базовых обмоток $U_2=3$ В×2; ток базовых обмоток $I_2=0{,}3$ А. Схема трансформатора показана на рис. 19, *е*.

1. Определяем напряжения и ЭДС обмоток трансформатора. В данном случае падение напряжения в обмотках будет незначительным, так как при частоте 10 кГц трансформатор имеет малые размеры и небольшое число витков. Поэтому можно считать, что напряжения обмоток приблизительно равны ЭДС:

$$E_1 \approx U_1 = 25 \text{ В} \cdot 2;$$
$$E_2 \approx U_2 = 3 \text{ В} \cdot 2,$$

Из табл. 12, вторая строка, третий столбец $E_3 \approx U_3 = 12+2=14$ В.

2. Находим токи обмоток (действующие значения). Из табл. 12, вторая строка, четвертый столбец $I_3 = 5$ А;

$$I_1 = 0{,}7 \cdot 5 \frac{14}{25} + 2 \cdot 0{,}3 \frac{3}{25} \approx 2 \text{ А}.$$

3. Находим габаритную мощность по формуле (9):

$$P_{\text{габ}} = \frac{1}{2}(25 \cdot 2 \cdot 2 + 3 \cdot 0{,}3 \cdot 2 + 14 \cdot 5) = 86 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

4. Для определения произведения $Q_c Q_o$ из табл. 10 выбираем материал кольцевого магнитопровода марки 50 НП толщиной 0,05 мм и индукцию $B=1$ Тл$<B_s=1{,}5$ Тл. Плотность тока определяем из графика на рис. 15 в зависимости от отношения $f/P_{\text{габ}}=10 \cdot 10^3/86=117$, при этом $J=6$ А/мм^2.

Задаемся значениями $\eta=0{,}85$; $k_c=0{,}7$; $k_м=0{,}20$, тогда по формуле (13) с поправкой на прямоугольную форму напряжения находим:

$$Q_c Q_o = \frac{86 \cdot 10^2}{2 \cdot 10^4 \cdot 1 \cdot 6 \cdot 0{,}85 \cdot 1 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}20} = 0{,}6 \text{ см}^4.$$

Из табл. 3 выбираем кольцевой магнитопровод типа ОЛ20/28-5, у которого $Q_c Q_o=0{,}63$ см^4; $Q_c=0{,}2$ см^2; $Q_o=3{,}14$ см^2.

5. Находим числа витков по формуле (10) с поправкой на прямоугольную форму напряжения и по формуле (5):

$$w_1 = \frac{25 \cdot 10^4}{4 \cdot 10^4 \cdot 1 \cdot 0{,}2 \cdot 0{,}7} = 45 \text{ витков} \cdot 2;$$

$$w_2 = 45 \frac{3}{25} \approx 6 \text{ витков} \cdot 2;$$

$$w_3 = 45 \frac{14}{25} \approx 25 \text{ витков}.$$

Таблица 12

Напряжения и токи обмоток трансформаторов, работающих в схемах транзисторных преобразователей

Вид схемы и нагрузки преобразователя	Схема трансформатора	Напряжение вторичной обмотки V_2	Ток вторичной обмотки I_2	Ток первичной обмотки I_1
Двухтактный преобразователь, работающий на двухполупериодную схему выпрямителя со средним выводом		U_0+1	$0{,}7\,I_0$	$0{,}7\,I_0 \frac{U_2}{U_1} + 2I_б \frac{U_б}{U_1}$
Двухтактный преобразователь, работающий на мостовую схему выпрямителя		U_0+2	I_0	$0{,}7\,I_0 \frac{U_2}{U_1} + 2\,I_б \frac{U_б}{U_1}$
Мостовой преобразователь, работающий на двухполупериодную схему выпрямителя со средним выводом		U_0+1	$0{,}7\,I_0$	$I_0 \frac{U_2}{U_1} + 4\,I_б \frac{U_б}{U_1}$

Вид схемы и нагрузки преобразователя	Схема трансформатора	Напряжение вторичной обмотки U_2	Ток вторичной обмотки I_2	Ток первичной обмотки I_1
Мостовой преобразователь, работающий на мостовую схему выпрямителя	$U_б; I_б$; $U_б; I_б$; U_1, I_1; I_2, U_2; $U_б; I_б$; $U_б; I_б$	U_0+2	I_0	$I_0 \dfrac{U_2}{U_1}+4 I_б \dfrac{U_б}{U_1}$

Примечание. Двухтактные преобразователи имеют по две базовые обмотки, а мостовые — четыре базовые обмотки.

6. Определяем диаметры проводов без изоляции по формуле (12):

$$d_1 = 1{,}13\sqrt{\frac{2}{6}} \approx 0{,}64 \text{ мм};$$

$$d_2 = 1{,}13\sqrt{\frac{0{,}3}{6}} \approx 0{,}25 \text{ мм};$$

$$d_3 = 1{,}13\sqrt{\frac{5}{6}} \approx 1{,}04 \text{ мм}.$$

7. Проверяем фактический коэффициент заполнения окна по формуле (15а):

$$k_м = \frac{0{,}64^2\cdot 45\cdot 2 + 0{,}25^2\cdot 6\cdot 2 + 1{,}04^2\cdot 25}{100\cdot 2^2} = 0{,}19.$$

Значение $k_м$ соответствует расчетному значению.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНЗИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Транзисторные преобразователи постоянного напряжения позволяют преобразовать заданное постоянное напряжение в более высокие или низкие переменные напряжения прямоугольной формы. Эти переменные напряжения могут быть затем выпрямлены с помощью обычных выпрямительных схем. Мощность, получаемая от преобразователей, лежит в пределах от единиц до нескольких сотен ватт. Повышенная частота, на которой работают преобразователи (1—50 кГц), позволяет значительно уменьшить габариты и массу трансформаторов и сглаживающих фильтров.

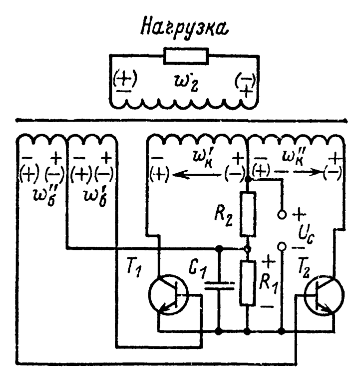


Рис. 20. Схема двухтактного транзисторного преобразователя напряжения.

Маломощный преобразователь представляет собой генератор с самовозбуждением (автогенератор), содержащий насыщающийся трансформатор. Переменное напряжение, снимаемое с обмоток этого трансформатора, затем выпрямляется и сглаживается фильтром. Более мощные преобразователи содержат автогенератор и усилитель мощности колебаний автогенератора. В этом случае выпрямительные устройства преобразователя получают питание от обмоток выходного трансформатора усилителя мощности.

Рассмотрим наиболее употребительную двухтактную схему преобразователя небольшой мощности с самовоз-

буждением (рис. 20), состоящую из двух транзисторов T_1 и T_2 типа *n-p-n* и трансформатора, имеющего коллекторную обмотку ($w_к$) со средним выводом, две базовые обмотки ($w_б$), соединенные последовательно, и выходную обмотку (w_2).

Транзисторы в схеме преобразователя работают в ключевом режиме: они поочередно открываются и закрываются. Открытый транзистор пропускает ток в направлении от коллектора к эмиттеру; падение напряжения на транзисторе при этом будет незначительным (0,5—2 В), что обеспечивает высокий КПД преобразователя. Закрытый транзистор практически не пропускает тока.

Делитель напряжения R_1R_2 и конденсатор C_1 служат для запуска преобразователя. При включении питающего напряжения $U_с$ на резисторе R_1 появляется положительное напряжение, которое поступает к базам транзисторов, вызывая открывание одного из них.

Предположим, что в некоторый момент времени открылся транзистор T_1, пропуская ток в направлении, указанном сплошной стрелкой на рис. 20. Тогда напряжение питания $U_с$ окажется почти полностью приложенным к половине коллекторной обмотки $w'_к$ и будет создавать на ней и на других обмотках ЭДС с полярностью, указанной на схеме рис. 20 (знаки даны без скобок). При этом ЭДС базовой обмотки $w'_б$ создает на базе транзистора T_1 положительное (открывающее) напряжение по отношению к эмиттеру, а ЭДС обмотки $w''_б$ в этот момент создает на базе транзистора T_2 отрицательное (закрывающее) напряжение по отношению к его эмиттеру. Следовательно, в то время, когда транзистор T_1 открыт, транзистор T_2 будет закрыт.

Под действием приложенного к обмотке $w_к$ напряжения $U_с$ в магнитопроводе трансформатора начинает расти магнитный поток Ф. Рост магнитного потока будет происходить до тех пор, пока поток не достигнет насыщения $Ф_s$. Очевидно, что в этот же момент магнитная индукция B достигнет значения насыщения B_s, так как $Ф=BQ_с$, где $Q_с$ — сечение стержня магнитопровода.

Транзистор T_1 будет открыт только до тех пор, пока магнитный поток в магнитопроводе трансформатора не достигнет значения насыщения $Ф_s$. В этот момент скорость изменения магнитного потока станет близкой к

нулю и ЭДС всех обмоток, пропорциональные скорости изменения магнитного потока, также станут равными нулю. Резкое уменьшение токов в обмотках, происходящее при этом, вызывает в соответствии с законом Ленца появление в обмотках ЭДС противоположной полярности, стремящихся поддержать падающие токи (знаки в скобках на рис.20).

Теперь базовая обмотка $w_б$ создает на базе транзистора T_2 положительное напряжение по отношению к

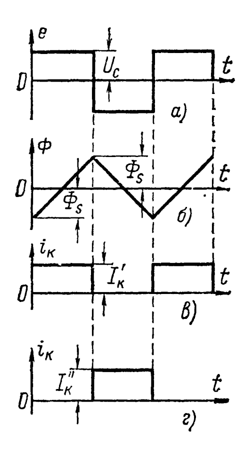


Рис. 21. Формы напряжения (*а*), магнитного потока (*б*) и токов в половинах коллекторной обмотки (*в*, г) трансформатора преобразователя.

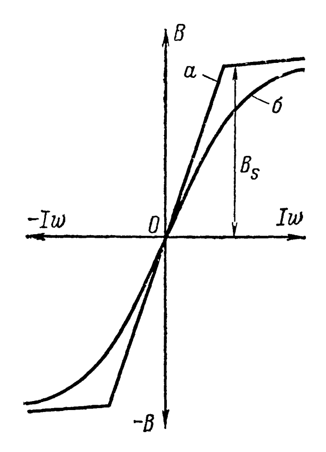


Рис. 22. Кривые перемагничивания.

кривая *а* — сплав типа пермаллоя; кривая *б* — электротехническая сталь.

эмиттеру, что приводит к открыванию этого транзистора и возникновению тока в коллекторной обмотке $w''_к$ в направлении, указанном на рис. 20 пунктирной стрелкой, при этом ЭДС базовой обмотки $w''_б$ возрастает, что вызывает дальнейшее увеличение коллекторного тока, и т. д. Процесс протекает лавинообразно и очень быстро приводит к полному открыванию транзистора T_2, закрывая одновременно транзистор T_1. В результате напряжение питания $U_с$ окажется приложенным к другой половине коллекторной обмотки $w''_к$. Затем процесс повторяется, приводя к открыванию транзистора T_1 и закрыва-

нию транзистора T_2. Так как напряжение U_c является постоянным, то напряжение на каждой половине коллекторной обмотки имеет прямоугольную форму с амплитудой U_c (рис. 21, *а*). Магнитный поток при этом имеет пилообразную форму (рис. 21, *б*). Токи в половинах коллекторной обмотки имеют форму прямоугольников; длительность протекания тока в каждой половине обмотки равна половине периода (рис. 21, *в* и *г*).

Для того чтобы обеспечить быстрое и четкое переключение транзисторов, в качестве магнитопроводов обычно применяют специальные сплавы (пермаллои) с прямоугольной (или почти прямоугольной) кривой перемагничивания. У таких сплавов (например, марок 50НП, 79НМ) индукция насыщения B_s имеет резко выраженное значение в отличие от обычной электротехнической стали, у которой кривая перемагничивания имеет плавный характер и значение B_s выражено нечетко (рис. 22). Следует еще раз подчеркнуть, что обычные трансформаторы питания всегда работают при индукциях ниже индукции насыщения.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

НОМЕНКЛАТУРА АНОДНО-НАКАЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТИПА ТАН, ВЫПУСКАЕМЫХ ПРОМЫШЛЕННОСТЬЮ ДЛЯ СЕТИ С ЧАСТОТОЙ 50 Гц (рис. 23)

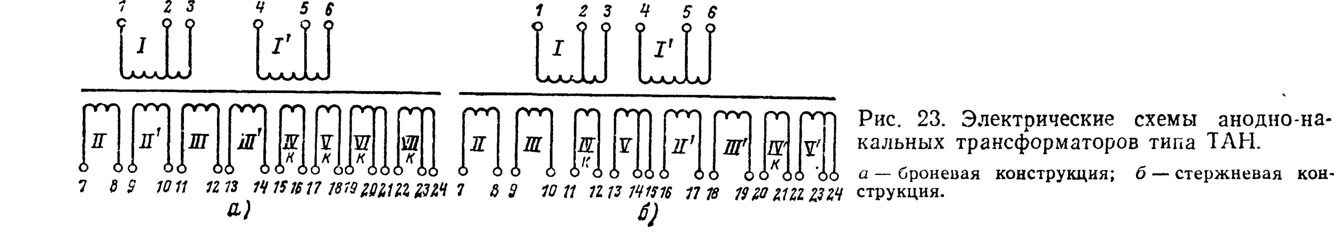


Рис. 23. Электрические схемы анодно-накальных трансформаторов типа ТАН.

а — броневая конструкция; *б* — стержневая конструкция.

Трансформаторы броневой конструкции

Тип магнитопровода, мощность трансформатора	Тип трансформатора	Ток первичной обмотки, А	Напряжение вторичных обмоток, В				Ток вторичных обмоток, А			
			II, II′	III, III′	IV к, V к	VI к, VII к	II, II′	III, III′	IV к, V к	VI к, VII к
ШЛ20×20, 36 В·А	ТАН1	0,37/0,215	28	28	6,3	5/6,3	0,24	0,19	0,24	0,8
	ТАН2	0,37/0,215	56	40	16	5/6,3	0,095	0,14	0,14	0,8
	ТАН3	0,37/0,215	56	56	12,6	5/6,3	0,104	0,104	0,104	0,8
	ТАН4	0,37/0,215	80	80	20	5/6,3	0,075	0,07	0,075	0,8
	ТАН5	0,37/0,215	80	56	24	5/6,3	0,07	0,095	0,095	0,8

Продолжение

Тип магнитопровода, мощность трансформатора	Тип трансформатора	Ток первичной обмотки, А	Напряжение вторичных обмоток, В				Ток вторичных обмоток, А			
			II, II'	III, III'	IVк, Vк	VIк, VIIк	II, II'	III, III'	IVк, Vк	VIк, VIIк
ШЛ20×20, 36 В·А	ТАН6	0,37/0,215	125	112	13	5/6,3	0,055	0,048	0,055	0,8
	ТАН7	0,37/0,215	180	112	20	5/6,3	0,036	0,05	0,05	0,8
	ТАН8	0,37/0,215	160	140	20	5/6,3	0,04	0,04	0,04	0,8
	ТАН9	0,37/0,215	315	125	25	5/6,3	0,025	0,035	0,035	0,8
	ТАН10	0,37/0,215	200	180	20	5/6,3	0,032	0,032	0,032	0,8
	ТАН11	0,37/0,215	250	224	26	5/6,3	0,026	0,026	0,026	0,8
	ТАН12	0,37/0,215	224	125	25	5/6,3	0,032	0,04	0,04	0,8
ШЛ20×25, 50 В·А	ТАН13	0,5/0,29	28	28	6,3	5/6,3	0,34	0,25	0,34	1,05
	ТАН14	0,5/0,29	56	40	16	5/6,3	0,14	0,185	0,185	1,05
	ТАН15	0,5/0,29	56	56	12,6	5/6,3	0,15	0,14	0,15	1,05
	ТАН16	0,5/0,29	80	56	24	5/6,3	0,09	0,15	0,15	1,05
	ТАН17	0,5/0,29	80	80	20	5/6,3	0,12	0,08	0,12	1,05
	ТАН18	0,5/0,29	125	112	13	5/6,3	0,08	0,063	0,08	1,05
	ТАН19	0,5/0,29	180	112	20	5/6,3	0,056	0,06	0,06	1,05
	ТАН20	0,5/0,29	160	140	20	5/6,3	0,053	0,06	0,06	1,05
	ТАН21	0,5/0,29	200	180	20	5/6,3	0,047	0,045	0,047	1,05
	ТАН22	0,5/0,29	224	125	25	5/6,3	0,043	0,057	0,057	1,05
	ТАН23	0,5/0,29	315	125	25	5/6,3	0,035	0,05	0,05	1,05
	ТАН24	0,5/0,29	250	224	26	5/6,3	0,035	0,038	0,038	1,05
	ТАН25	0,5/0,29	315	280	35	5/6,3	0,028	0,03	0,03	1,05
	ТАН26	0,5/0,29	355	200	25	5/6,3	0,03	0,034	0,034	1,05

ШЛ20×32, 60 В·А	ТАН27	0,6/0,35	28	28	6,3	5/6,3	0,35	0,29	0,35	1,6
	ТАН28	0,6/0,35	56	40	16	5/6,3	0,16	0,2	0,2	1,6
	ТАН29	0,6/0,35	56	56	12,6	5/6,3	0,175	0,145	0,175	1,6
	ТАН30	0,6/0,35	80	56	24	5/6,3	0,1	0,15	0,15	1,6
	ТАН31	0,6/0,35	80	80	20	5/6,3	0,1	0,1	0,12	1,6
	ТАН32	0,6/0,35	125	112	13	5/6,3	0,087	0,073	0,087	1,6
	ТАН33	0,6/0,35	180	112	20	5/6,3	0,063	0,065	0,065	1,6
	ТАН34	0,6/0,35	160	140	20	5/6,3	0,065	0,06	0,065	1,6
	ТАН35	0,6/0,35	224	125	25	5/6,3	0,045	0,065	0,065	1,6
	ТАН36	0,6/0,35	200	180	20	5/6,3	0,05	0,05	0,05	1,6
	ТАН37	0,6/0,35	250	224	26	5/6,3	0,04	0,04	0,04	1,6
	ТАН38	0,6/0,35	315	125	25	5/6,3	0,043	0,04	0,043	1,6
	ТАН39	0,6/0,35	315	280	35	5/6,3	0,032	0,032	0,032	1,6
	ТАН40	0,6/0,35	315	200	25	5/6,3	0,029	0,043	0,043	1,6
ШЛ20×40, 78 В·А	ТАН41	0,77/0,48	28	28	6,3	5/6,3	0,475	0,375	0,475	1,9
	ТАН42	0,77/0,48	56	40	16	5/6,3	0,21	0,27	0,27	1,9
	ТАН43	0,77/0,48	56	56	12,6	5/6,3	0,23	0,2	0,23	1,9
	ТАН44	0,77/0,48	80	56	24	5/6,3	0,14	0,2	0,2	1,9

Тип магнитопровода, мощность трансформатора	Тип трансформатора	Ток первичной обмотки, А	Напряжение вторичных обмоток, В				Ток вторичных обмоток, А			
			II, II′	III, III′	IVк, Vк	VI, VII′к	II, II′	III, III′	IVк, Vк	VI, VII′к
ШЛ20×40, 78 В·А	ТАН45	0,77/0,48	80	80	20	5/6,3	0,16	0,14	0,16	1,9
	ТАН46	0,77/0,48	125	112	13	5/6,3	0,118	0,096	0,118	1,9
	ТАН47	0,77/0,48	180	112	20	5/6,3	0,088	0,083	0,088	1,9
	ТАН48	0,77/0,48	160	140	20	5/6,3	0,084	0,084	0,084	1,9
	ТАН49	0,77/0,48	224	125	25	5/6,3	0,062	0,085	0,085	1,9
	ТАН50	0,77/0,48	200	180	20	5/6,3	0,065	0,07	0,07	1,9
	ТАН51	0,77/0,48	250	224	26	5/6,3	0,054	0,054	0,054	1,9
	ТАН52	0,77/0,48	315	125	25	5/6,3	0,043	0,09	0,09	1,9
	ТАН53	0,77/0,48	315	280	35	5/6,3	0,043	0,043	0,043	1,9
	ТАН54	0,77/0,48	355	200	25	5/6,3	0,035	0,064	0,064	1,9
ШЛ25×25, 100 В·А	ТАН55	0,95/0,55	28	28	6,3	5/6,3	0,605	0,485	0,605	2,45
	ТАН56	0,95/0,55	56	40	16	5/6,3	0,29	0,33	0,33	2,45
	ТАН57	0,95/0,55	56	56	12,6	5/6,3	0,3	0,25	0,3	2,45
	ТАН58	0,95/0,55	80	56	24	5/6,3	0,195	0,24	0,24	2,45
	ТАН59	0,95/0,55	80	80	20	5/6,3	0,2	0,18	0,2	2,45
	ТАН60	0,95/0,55	125	112	13	5/6,3	0,15	0,125	0,15	2,45
	ТАН61	0,95/0,55	180	112	20	5/6,3	0,1	0,125	0,125	2,45
	ТАН62	0,95/0,55	160	140	20	5/6,3	0,11	0,105	0,105	2,45
	ТАН63	0,95/0,55	224	125	25	5/6,3	0,08	0,11	0,11	2,45
	ТАН64	0,95/0,55	200	180	20	5/6,3	0,083	0,09	0,09	2,45
	ТАН65	0,95/0,55	250	224	26	5/6,3	0,065	0,073	0,073	2,45
	ТАН66	0,95/0,55	315	125	25	5/6,3	0,055	0,115	0,115	2,45
	ТАН67	0,95/0,55	315	280	35	5/6,3	0,045	0,065	0,065	2,45
	ТАН68	0,95/0,55	355	200	25	5/6,3	0,053	0,07	0,07	2,45

Трансформаторы стержневой конструкции

Тип магнитопровода, мощность трансформатора	Тип трансформатора	Ток первичной обмотки, А	Напряжение вторичных обмоток, В				Ток вторичных обмоток, А			
			II, II′	III, III′	IVк, IV′к	V, V′	II, II′	III, III′	IVк, IV′к	V, V′
ПЛ16×32—80, 122 В·А	ТАН69	1,14/0,66	28	28	6,3	5/6,3	0,68	0,71	0,71	2,8
	ТАН70	1,14/0,66	56	40	16	5/6,3	0,3	0,47	0,47	2,8
	ТАН71	1,14/0,66	56	56	12,6	5/6,3	0,295	0,39	0,39	2,8
	ТАН72	1,14/0,66	80	56	24	5/6,3	0,21	0,33	0,33	2,8
	ТАН73	1,14/0,66	80	80	20	5/6,3	0,24	0,24	0,24	2,8
	ТАН74	1,14/0,66	125	112	13	5/6,3	0,18	0,165	0,18	2,8
	ТАН75	1,14/0,66	180	112	20	5/6,3	0,13	0,15	0,15	2,8
	ТАН76	1,14/0,66	160	140	20	5/6,3	0,13	0,14	0,14	2,8
	ТАН77	1,14/0,66	224	125	25	5/6,3	0,1	0,13	0,13	2,8
	ТАН78	1,14/0,66	200	180	20	5/6,3	0,105	0,11	0,11	2,8
	ТАН79	1,14/0,66	250	224	26	5/6,3	0,085	0,088	0,088	2,8
	ТАН80	1,14/0,66	315	125	25	5/6,3	0,07	0,14	0,14	2,8
	ТАН81	1,14/0,66	315	280	35	5/6,3	0,065	0,072	0,072	2,8
	ТАН82	1,14/0,66	355	200	25	5/6,3	0,065	0,09	0,09	2,8
ПЛ20×40—50, 153 В·А	ТАН104	1,4/0,82	28	28	6,3	5/6,3	0,89	0,9	0,9	3,3
	ТАН105	1,4/0,82	56	40	16	5/6,3	0,47	0,525	0,525	3,3
	ТАН106	1,4/0,82	56	56	12,6	5/6,3	0,4	0,49	0,49	3,3
	ТАН107	1,4/0,82	80	56	24	5/6,3	0,29	0,41	0,41	3,3
	ТАН108	1,4/0,82	80	80	20	5/6,3	0,26	0,35	0,35	3,3
	ТАН109	1,4/0,82	125	112	13	5/6,3	0,23	0,215	0,23	3,3
	ТАН110	1,4/0,82	180	112	20	5/6,3	0,17	0,19	0,19	3,3
	ТАН111	1,4/0,82	160	140	20	5/6,3	0,17	0,18	0,18	3,3

Тип магнитопровода, мощность трансформатора	Тип трансформатора	Ток первичной обмотки, А	Напряжение вторичных обмоток, В				Ток вторичных обмоток, А			
			II, II′	III, III′	IVк, IV′к	V, V′	II, II′	III, III′	IVк, IV′к	V, V′
ПЛ20×40—50, 153 В·А	ТАН112	1,4/0,82	224	125	25	5/6,3	0,12	0,19	0,19	3,3
	ТАН113	1,4/0,82	200	180	20	5/6,3	0,14	0,14	0,14	3,3
	ТАН114	1,4/0,82	250	224	26	5/6,3	0,11	0,115	0,115	3,3
	ТАН115	1,4/0,82	315	125	25	5/6,3	0,087	0,19	0,19	3,3
	ТАН116	1,4/0,82	315	280	35	5/6,3	0,085	0,092	0,092	3,3
	ТАН117	1,4/0,82	355	200	25	5/6,3	0,08	0,125	0,125	3,3
ПЛ20×40—60, 190 В·А	ТАН118	1,74/1,0	125	112	13	5/6,3	0,26	0,28	0,28	4,35
	ТАН119	1,74/1,0	180	112	20	5/6,3	0,21	0,22	0,22	4,35
	ТАН120	1,74/1,0	160	140	20	5/6,3	0,205	0,218	0,218	4,35
	ТАН121	1,74/1,0	224	125	25	5/6,3	0,175	0,19	0,19	4,35
	ТАН122	1,74/1,0	200	180	20	5/6,3	0,163	0,175	0,175	4,35
	ТАН123	1,74/1,0	250	224	26	5/6,3	0,13	0,14	0,14	4,35
	ТАН124	1,74/1,0	315	125	25	5/6,3	0,14	0,155	0,155	4,35

ПЛ20×40—100, 280 В·А	ТАН125	2,5/1,45	125	112	13	5/6,3	0,42	0,42	0,42	5
	ТАН126	2,5/1,45	180	112	20	5/6,3	0,335	0,37	0,37	5
	ТАН127	2,5/1,45	160	140	20	5/6,3	0,335	0,325	0,335	5
	ТАН128	2,5/1,45	224	125	25	5/6,3	0,31	0,24	0,31	5
	ТАН129	2,5/1,45	200	180	20	5/6,3	0,27	0,255	0,27	5
	ТАН130	2,5/1,45	315	280	35	5/6,3	0,165	0,18	0,18	5
	ТАН131	2,5/1,45	250	224	25	5/6,3	0,21	0,215	0,215	5
	ТАН132	2,5/1,45	315	125	25	5/6,3	0,215	0,255	0,255	5
	ТАН133	2,5/1,45	355	200	25	5/6,3	0,16	0,22	0,22	5
ПЛ25×50—80, 440 В·А	ТАН134	3,9/2,3	200	180	20	5/6,3	0,4	0,4	0,4	10
	ТАН135	3,9/2,3	250	224	26	5/6,3	0,32	0,32	0,32	10
	ТАН136	3,9/2,3	280	315	35	5/6,3	0,24	0,265	0,265	10
	ТАН137	3,9/2,3	315	125	25	5/6,3	0,4	0,2	0,4	10
	ТАН138	3,9/2,3	355	200	25	5/6,3	0,285	0,25	0,285	10

Примечания: 1. Пример полного обозначения трансформатора ТАН107—127/220—50.

2. Ток первичной обмотки указан в числителе при напряжении сети 127 В, а в знаменателе — при 220 В.

3. Схема включения выводов первичной обмотки трансформатора ТАН зависит от напряжения питающей сети (127 или 220 В) и от конструкции трансформатора (броневой или стержневой).

При напряжении сети 127 В и броневой конструкции трансформатора (ШЛ) между собой соединяются выводы *1* и *4*, а также *3* и *6*; питающее напряжение подается на выводы *1* и *3* (или *4* и *6*). В случае стержневой конструкции (ПЛ) между собой соединяются выводы *1* и *6*, а также *3* и *4*; питающее напряжение подается на выводы *1* и *3* (или на *6* и *4*).

При напряжении сети 220 В и броневой конструкции трансформатора между собой соединяются выводы *2* и *4*, а питающая сеть подается на выводы *1* и *5*. В случае стержневой конструкции между собой соединяются выводы *2* и *5*, а питающая сеть подается на выводы *1* и *4*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Цыкин Г. С.** Трансформаторы низкой частоты. — М.: Связьиздат, 1955. — 430 с.

2. **Колосов А. А.** Резонансные системы и резонансные усилители. — М.: Связьиздат, 1949. — 560 с.

3. **Ицхоки Я. С.** Импульсная техника. — М: Советское радио, 1949. — 296 с.

4. **Бертинов А. И., Кофман Д. Б.** Тороидальные трансформаторы статических преобразователей — М.: Энергия, 1970. — 96 с.

5. **Видмар М.** Трансформаторы. — М — Л.: ГНТИ, 1931. — 592 с.

6. **Петров Г. Н.** Электрические машины. Часть 1. Введение. Трансформаторы. — М.: Энергия, 1974. — 240 с.

7. **Тихомиров П. М.** Расчет трансформаторов. — М.: Энергия, 1976. — 544 с.

8. **Белопольский И. И., Каретникова Е. И., Пикалова Л. Г.** Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. — М.: Энергия, 1973. — 399 с.

9. **Каретникова Е. И., Рычина Т. А., Ермаков А. И.** Трансформаторы питания и дроссели фильтров для радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Советское радио, 1973, — 180 с.

10. **Бальян Р. Х.** Трансформаторы для радиоэлектроники. — М.: Советское радио, 1971. — 720 с.

11. **Журавлев А. А., Мазель К. Б.** Преобразователи постоянного напряжения на транзисторах. — М.: Энергия, 1974 —89 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Климентий Борисович Мазель

ТРАНСФОРМАТОРЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Редактор издательства *Н. В. Ефимова*
Обложка художника *В. Д. Козлова*
Технический редактор *Н. П. Собакина*
Корректор *И. А. Володяева*

ИБ № 2805

Сдано в набор 07 08 81 Подписано в печать 23.10 81. Т-27734. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 3. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ л 4,2. Уч-изд. л. 4,18. Тираж 80 000 экз Заказ 826. Цена 20 к.

Энергоиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Владимирская типография «Союзполиграфпрома» при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли

600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7

Цена 20 к.